

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.12.001

准单向汉麻纺织结构增强不饱和聚酯树脂 复合材料力学性能及优化设计

闫玉欢¹, 吴华伟², 王春红¹, 鹿超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: 为了探究不同纺织结构的汉麻纤维增强体对复合材料性能的影响,以汉麻粗纱为主要增强体制备了准单向汉麻纤维织物增强不饱和聚酯树脂复合材料(QUHFC),并与以汉麻粗纱毡增强复合材料(HRFC)和平纹汉麻粗纱织物增强复合材料(PHFC)进行了对比分析,探究了其力学性能差异及产生差异和失效的机理。结果表明,QUHFC的力学性能最优,其中拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量分别为180.06 MPa, 11.48 GPa, 229.48 MPa和24.07 GPa。进一步以织物组织、粗纱捻度、经纱密度为影响因素,采用正交实验设计对准单向汉麻织物增强复合材料预制件的力学性能进行分析,得知在采用以细度为(1 100±34.1) tex的粗纱为纬纱,以细度为50.5 tex的细纱为经纱制备的准单向预制件为增强体时,织物组织的变化(平纹、斜纹、方平)对复合材料拉伸和弯曲性能产生的影响最大。当织物组织为方平组织、经纱密度为60根/10 cm、纬纱捻度为4捻/10 cm时,拉伸强度最大。当织物组织为斜纹组织、经纱密度为40根/10 cm、纬纱捻度为0捻/10 cm(即无捻纱)时,弯曲强度最大。

关键词: 汉麻纤维; 纺织结构; 准单向复合材料; 力学性能; 正交实验设计

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)12-0001-07

Comparative Analysis and Optimization of Quasi Unidirectional Hemp Textile Structure Reinforced Unsaturated Polyester Resin Composites

Yan Yuhuan¹, Wu Huawei², Wang Chunhong¹, Lu Chao¹

(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 explore the influence of hemp fiber reinforcement with different textile structures on the properties of composites, quasi unidirectional hemp fabric reinforced composite (QUHFC) was prepared with hemp roving as the main reinforcement body, and compared with hemp roving felt reinforced composite (HRFC) and plain hemp roving fabric reinforced composite (PHFC). The mechanical properties of composites reinforced with different textile-structure preforms and the mechanism of failure were explored. The results show that the mechanical properties of QUHFC are the best. The tensile strength, tensile modulus, flexural strength and flexural modulus are 180.06 MPa, 11.48 GPa, 229.48 MPa and 24.07 GPa respectively. Further with fabric, roving twist and warp density for the influencing factors, and by orthogonal experimental design on the bachelor, the mechanical properties of linen fabric reinforced composite casting are analyzed, and learned that in the fineness of (1 100±34.1) tex. Tex roving as weft, fineness of 50.5 tex yarn as warp yarn preparation of one-way fabrication to strengthen the body. The variation of fabric structure (plain weave, twill weave, basket weave) has the greatest influence on the tensile and bending properties of composites. When the fabric structure is basket weave, the warp density is 60 picks /10 cm, and the weft twist is 4 turns/10 cm, the tensile strength reaches the maximum. When the fabric is twill weave, the warp density is 40 picks/10 cm, and the weft twist is 0 turns/10 cm, the bending strength is the maximum.

Keywords : hemp fiber ; textile structure ; quasi unidirectional composites ; mechanical property ; orthogonal experimental design

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11802205)

通信作者: 吴华伟, 硕士, 教授, 研究方向为天然纤维增强复合材料

收稿日期: 2022-10-12

引用格式: 闫玉欢, 吴华伟, 王春红, 等. 准单向汉麻纺织结构增强不饱和聚酯树脂复合材料力学性能及优化设计[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12): 1-7.

Yan Yuhuan, Wu Huawei, Wang Chunhong, et al. Comparative analysis and optimization of quasi unidirectional hemp textile structure reinforced unsaturated polyester resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 1-7.

在全球化石资源趋紧及环境恶化背景下,植物纤维凭借其来源丰富、绿色环保、成本低廉等优势在复合材料市场中的关注度不断增加^[1-2]。其中最具有代表性的麻类韧皮纤维具有与玻璃纤维媲美的比强度和比模量,具备比玻璃纤维更好的隔热和隔音性能,使其在交通轨道、汽车、休闲等领域具有广阔的发展前景^[3-5]。

为了使麻纤维增强效果最大化,研究者通常将天然纤维制成粗纱或条带用于树脂基体的增强材料^[6],然而完全单向排列的麻纤维导致增强体的层间结合效果较差^[7-9]。织造技术可以为增强体的结构设计提供较多的选择,也为进一步制备更高性能的麻纤维增强复合材料提供了可行性^[10]。

近年来,有许多国内外研究人员围绕麻纤维及纺织结构材料增强体做了相关的研究。展江湖等^[11]研究表明,苧麻纤维的添加提高了复合材料的拉伸、弯曲强度,且随纤维添加量的增加而增大。张永励等^[12]研究表明,不同织物形式的天然纤维,由于其纤维屈曲程度不同,织物结构对复合材料的拉伸性能的影响较大。A. Usman 等^[13]比较了平纹、缎纹、单向、双向4种机织物基复合材料的力学性能,得出单向机织复合材料结构的拉伸强度高于传统和双向机织复合材料结构。C. A. Clémence 等^[14]提出在纬向使用低捻粗纱,在经纱方向只加少量小捻纱,制备一种在一个方向上使纤维含量最大化的复合增强体。Wang Bo 等^[15]研究准单向编织织物的构型对准各向同性复合层压板压缩破坏模式的影响,研究表明,长纬距织物制备的复合层压板的抗压强度大于标准纬距织物制备的抗压强度。

鉴于目前国内对于准单向麻纤维增强复合材料在纺织结构方面的研究有限,且汉麻纤维在我国产量丰富,力学性能优良,是一种可再生、可降解、绿色环保的天然植物纤维^[16]。为了进一步提升汉麻纤维增强树脂基复合材料领域的应用价值,笔者在前期研究的基础上以汉麻纤维为主要原料,以汉麻粗纱为复合材料增强体的主体部分,通过平纹织造的方式制备了准单向汉麻粗纱预制件(QUHF),再通过热压方法制备了不饱和聚酯树脂(UP)基复合材料,与平纹汉麻粗纱织物(PHF)增强 UP 复合材料和汉麻粗纱单向毡(HRF)增强 UP 复合材料进行比较分析。以粗纱捻度、经纱密度、织物组织为影响因

素,采用3因素3水平正交实验设计确定了影响准单向汉麻粗纱预制件的力学性能的影响因素顺序,并重点分析了织物组织与纬纱捻度对复合材料力学性能的影响。

1 实验方法

1.1 主要原材料

汉麻粗纱:细度为 $(1\ 100\pm 34.1)\text{tex}$,捻度为2捻/10 cm,后续实验中手动退捻加捻得到捻度分别为0捻/10 cm(即无捻纱)与4捻/10 cm的粗纱,山西绿洲纺织有限责任公司;

汉麻细纱:细度为50.5 tex,山西绿洲纺织有限责任公司;

促进剂、固化剂、脱模剂:中山市鑫得佳玻璃纤维复合材料有限公司;

UP:196,中山市鑫得佳玻璃纤维复合材料有限公司。

1.2 仪器与设备

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;

扫描电子显微镜(SEM):TM-1000型,日本株式会社日立高新技术那柯事业所;

超景深三维显微系统:Z16APOA型,日本徕卡微系统有限公司。

1.3 实验设计

主要探究汉麻纺织结构增强体类型及增强体结构参数对复合材料性能的影响,增强体类型包括平纹组织的汉麻粗纱织物(PHF),汉麻粗纱单向毡(HRF),准单向汉麻粗纱织物(QUHF),以粗纱捻度、经纱密度、织物组织为变量,设计了 $L_9(3^3)$ 因素3水平正交实验,探究准单向汉麻粗纱预制件的最优制备工艺,包括复合材料增强体参数,其中因素A为织物组织,分为方平、斜纹和平纹;因素B为经纱密度,分为60,40,20根/10 cm;因素C为纬纱捻度,分为0,2,4捻/10 cm,因素水平表见表1,复合材料增强体参数列于表2。

表1 因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
A	方平	斜纹	平纹
B[根·(10 cm) ⁻¹]	60	40	20
C[捻·(10 cm) ⁻¹]	0	2	4

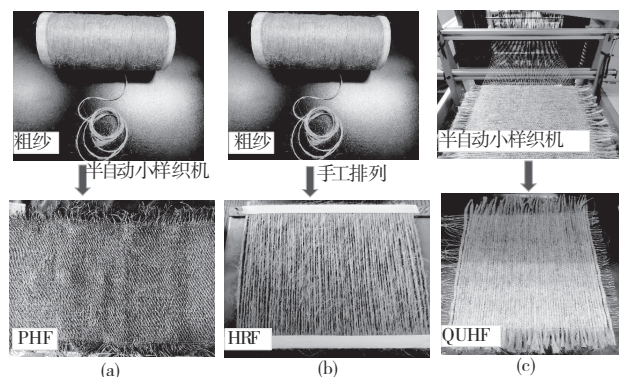
表2 汉麻预制件及复合材料参数

试样 编号	织物 组织	增强体				复合材料	
		经向		纬向		汉麻树脂 质量比	厚度/ mm
		类别	经密/ [根·(10 cm) ⁻¹]	类别	纱线捻度/ [捻·(10 cm) ⁻¹]		
PHFC	平纹 组织	粗纱	20	粗纱	2	30:70	3±0.15
HRFC	纬纱 单向 结构	无	无	粗纱	0	30:70	3±0.15
QUHFC	平纹 组织	细纱	40	粗纱	0	30:70	3±0.15
QUH- FC1	方平 组织	细纱	60	粗纱	0	30:70	3±0.15
QUH- FC2	方平 组织	细纱	40	粗纱	2	30:70	3±0.15
QUH- FC3	方平 组织	细纱	20	粗纱	4	30:70	3±0.15
QUH- FC4	斜纹 组织	细纱	60	粗纱	2	30:70	3±0.15
QUH- FC5	斜纹 组织	细纱	40	粗纱	4	30:70	3±0.15
QUH- FC6	斜纹 组织	细纱	20	粗纱	0	30:70	3±0.15
QUH- FC7	平纹 组织	细纱	60	粗纱	4	30:70	3±0.15
QUH- FC8	平纹 组织	细纱	40	粗纱	2	30:70	3±0.15
QUH- FC9	平纹 组织	细纱	20	粗纱	0	30:70	3±0.15

1.4 复合材料制备

图1为各预制件的制备过程,其中PHF以汉麻粗纱为原料,采用半自动小样织机制备而成;HRF以汉麻粗纱为原料,采用手工平行排列制备而成;QUHF以汉麻粗纱为纬纱,以汉麻细纱为经纱,采用半自动小样织机制备而成。

图2为制备复合材料流程图,增强体与树脂比



a—PHF; b—HRF; c—QUHF

图1 增强体制备

为30:70,为了增加树脂流动性,提升树脂对预制件的渗透效果,笔者采用苯乙烯为树脂稀释剂,添加量为树脂质量的5%,固化剂为树脂质量的1.5%,促进剂添加量为树脂质量的0.75%。平纹汉麻粗纱织物采用0°/90°的经纬交叉铺层的方式进行铺层,汉麻粗纱单向毡与准单向汉麻织物均以90°纬向铺层的方式进行铺层,将树脂均匀地涂覆在各层增强体上完成预浸料的制备,复合材料成型工艺为:10 MPa 室温冷压 5 min→5 MPa, 60℃条件下热压 30 min→5 MPa, 75℃条件下热压 90 min→5 MPa 压力条件下恢复室温后脱模完成复合材料制备。

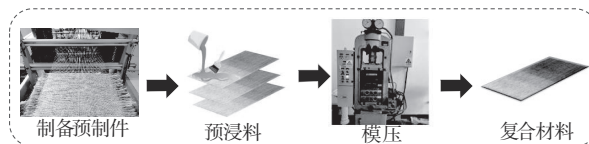


图2 复合材料制备

1.5 性能测试与表征

拉伸性能:按照 ASTM D638-2010 测试,测试隔距为 90 mm,测试速度为 5 mm/min;

弯曲性能:按照 ASTM 790-30-2017 测试,测试隔距为 48 mm,测试速度为 2 mm/min;

横截面形貌:采用 SEM 对样品的形貌进行分析,加速电压为 15 kV。

2 结果与讨论

2.1 增强体类型对复合材料拉伸性能的影响

图3为不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料的纬向拉伸性能。

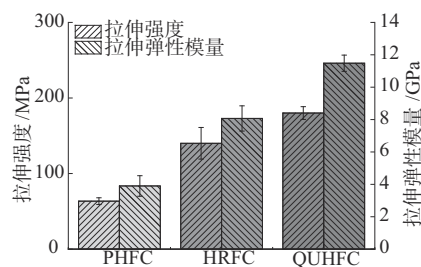


图3 不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料纬向拉伸性能

由图3可以看出,QUHFC的纬向拉伸性能最优,拉伸强度为180.1 MPa,拉伸弹性模量为11.5 GPa。比PHFC的拉伸强度提升64.7%,拉伸弹性模量提升66.1%,相较于HRFC拉伸强度提升了22.2%,拉伸弹性模量提升了29.7%。图4为不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料拉伸应力-应变曲线。由图4可得出,PHFC的断裂伸长率、拉伸应力与QUHFC和HRFC相比差距明显,在相同的应变

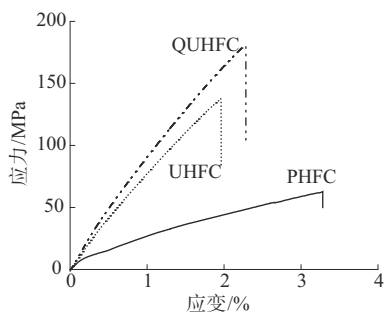


图4 不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料拉伸应力-应变曲线下,QUHFC具有更高的应力。

对于纤维增强复合材料,纤维起到主要承载作用,基体起到传递载荷的作用。在载荷作用下,应力会由基体传递至纤维,当载荷超过复合材料的极限抗拉强度时会造成复合材料失效^[17]。织物预制件没有经纱固结会导致结构的稳定性不强,但是由于无交织点的单向排列的纤维没有屈曲结构,纤维排列规律,取向程度高,从而导致其拉伸性能更强。图5为不同纺织纤维结构预制件及其增强UP复合材料失效机理图。

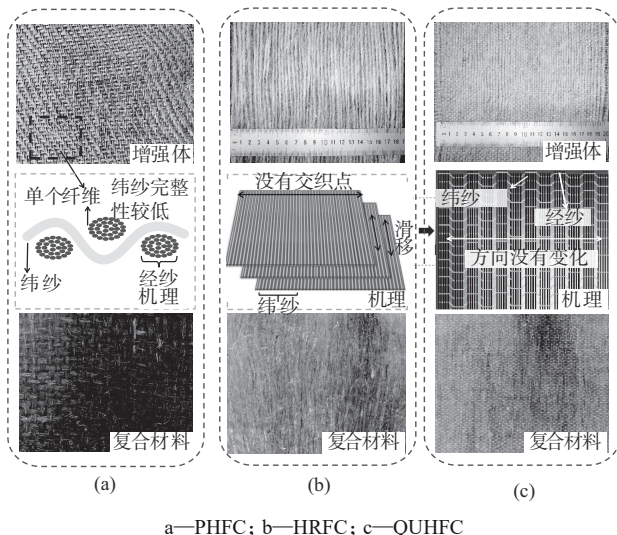
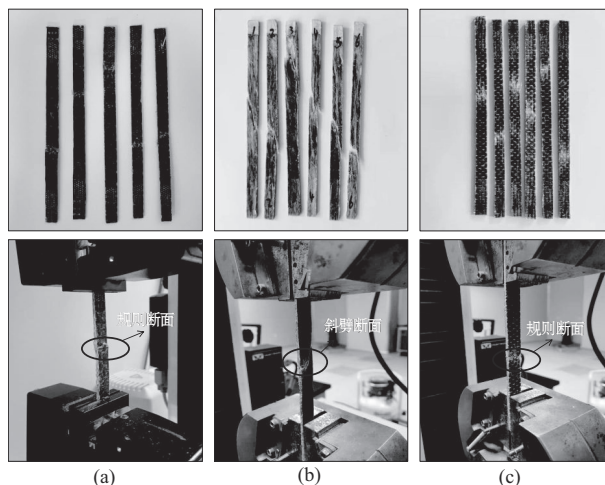


图5 不同纺织纤维结构预制件及其增强UP复合材料失效机理图

从图5可以看出,经纬向均为汉麻粗纱的平纹织物,由于平纹组织中单位面积内存在更多的交织机构,导致增强体中纤维取向度较低,在复合材料中不能充分发挥麻纤维的轴向高力学性能^[18],同时较多的交织点会在一定程度上对纤维造成损伤,从而导致其拉伸性能较低;经向无固结的汉麻粗纱毡其结构中纤维分布取向变化较小,但由于其层间无组织点固结,所以界面容易产生滑移,这在一定程度上影响了其拉伸强度;而准单向增强形式采用强度较好的粗纱为增强体且加入了经纱固结,这更能

大程度地保证受力方向具有高纤维含量,并保持纤维的低卷曲性不损伤纤维,保留了粗纱纤维的完整性并保证粗纱受力方向不发生改变,从而使复合材料的力学性能明显提升。图6为不同纤维纺织结构增强UP复合材料拉伸失效直观图。从图6可以看出,HRFC沿着垂直纤维分布方向的扩展裂纹出现斜劈的形态,这是因为纬纱无经纱固结,组织点少导致界面容易产生滑移。而PHFC与QUHFC因为均采用平纹组织的增强体,所以断面较为规整。



a—PHFC; b—HRFC c—QUHFC

图6 不同纤维纺织结构增强UP复合材料拉伸失效直观图

综上所述,在汉麻纤维的三种不同增强形式中,采用准单向汉麻粗纱织物作为增强体制得的复合材料力学性能最优。

2.2 增强体类型对复合材料弯曲性能的影响

图7为不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料的弯曲性能。

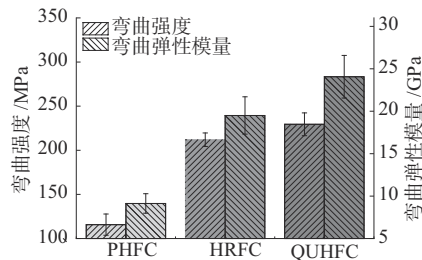


图7 不同汉麻纤维纺织结构增强UP复合材料的弯曲性能

从图7可以看出,QUHFC的弯曲性能最好,弯曲强度为229.5 MPa,弯曲弹性模量为24.1 GPa。比PHFC的弯曲强度提升了49.6%,弯曲弹性模量提升了62.1%;比HRFC的弯曲强度提升7.6%,弯曲弹性模量提升18.9%。图8为不同汉麻纤维纺织结构增

强UP复合材料的弯曲应力-应变曲线。通过图8可以得知,在应变相等时,QUHFC具有更高的应力,这是因为在弯曲测试中织物形式的经向固结可以有效地固定纬纱从而增加增强体与基体的结合程度,在最终弯曲失效时,QUHFC具有更高的弯曲断裂应力。

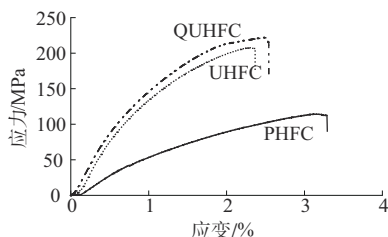


图8 不同汉麻纤维织物结构增强UP复合材料的弯曲应力-应变曲线

复合材料在弯曲断裂时其失效表现为纤维自身的断裂、纤维之间的滑移、粗纱增强体与树脂基体之间界面的滑移与破坏^[19]。而在弯曲测试中,弯曲强度因受力方向的不同,更多取决于在弯曲实验接触面上粗纱增强体与树脂基体的结合程度,而横向受力若有经纱固结可以更好地将纬纱固结住从而增加粗纱增强体与树脂基体的结合程度,此外粗纱的完整性也得以最大程度地保留,使得QUHFC的弯曲性能最好。图9为不同纤维织物结构增强UP复合材料弯曲断裂的失效图。

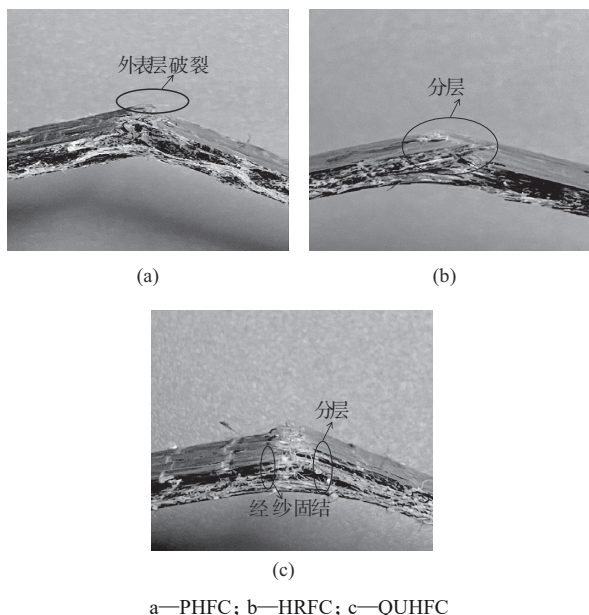


图9 不同纤维织物结构增强UP复合材料弯曲断裂的失效图

图9a为PHFC的断裂模式。可以看出因为平纹结构组织点较多,粗纱和粗纱间相互作用,不易产生滑移,但由于过多的交织点导致纤维多为屈曲状态,这也在一定程度上影响了其弯曲性能;图9b为

HRFC的断裂模式,因为没有经纱固结其界面的分层与滑移的问题导致其弯曲性能最低。图9c为QUHFC的断裂模式,可从图中看出虽然其在弯曲的过程中界面出现了分层,但经纱的存在一定程度上束缚了已经发生分层的界面中树脂基体的裂痕延展。

2.3 QUHFC参数正交设计结果分析

采用 $L_9(3^3)$ 因素3水平的实验优化设计QUHF/UP复合材料,以织物组织、经纱密度、纬纱捻度为影响因素,其中织物组织水平为方平组织、斜纹组织、平纹组织;经纱密度水平为60,40,20根/10 cm;纬纱捻度为0,2,4捻/10 cm。以拉伸强度与弯曲强度为指标进行表征,表3为正交实验设计结果。表4、表5为正交实验的极差分析结果。

表3 正交实验结果

试样编号	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa
QUHFC1	163.23±8.44	184.73±20.46
QUHFC2	162.34±12.27	174.25±5.54
QUHFC3	194.04±20.70	158.00±9.77
QUHFC4	161.85±22.20	184.11±13.10
QUHFC5	170.10±6.69	209.82±8.21
QUHFC6	173.66±16.47	173.73±10.42
QUHFC7	164.35±15.34	222.18±7.09
QUHFC8	144.59±30.67	170.36±6.04
QUHFC9	123.42±20.68	182.33±9.09

表4 拉伸强度极差分析表

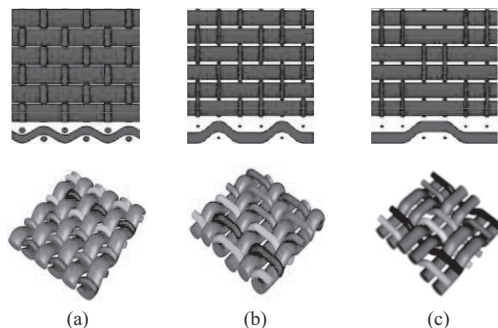
		MPa		
项目	A	B	C	
K_1	173.20	168.54	144.12	
K_2	163.14	159.01	163.71	
K_3	160.49	149.20	173.16	
极差	29.083	4.697	26.96	

表5 弯曲强度极差分析表

		MPa		
项目	A	B	C	
K_1	168.99	189.22	202.91	
K_2	197.01	192.76	171.35	
K_3	187.56	176.99	196.67	
极差	33.914	25.654	19.77	

由表4可知,在该实验中影响复合材料纵向拉伸强度的各因素主次顺序为 $A>C>B$,即织物组织>纬纱捻度>经纱密度。这是因为在纵向拉伸时主要受力的是纬向的粗纱,经纱虽然起到了固结的作用,但在小幅度经纱密度的变化中并没有很明显地影响拉伸强度。图10为不同织物组织直观对比图,从图10可以看出,由于各个织物组织的经纱固结纬纱方式不同,在一个组织循环中平纹组织的交织点最多导致纤维多为屈曲状态^[20],方平组织虽然组织点较少,但纤维大多较平直,这在一定程度上

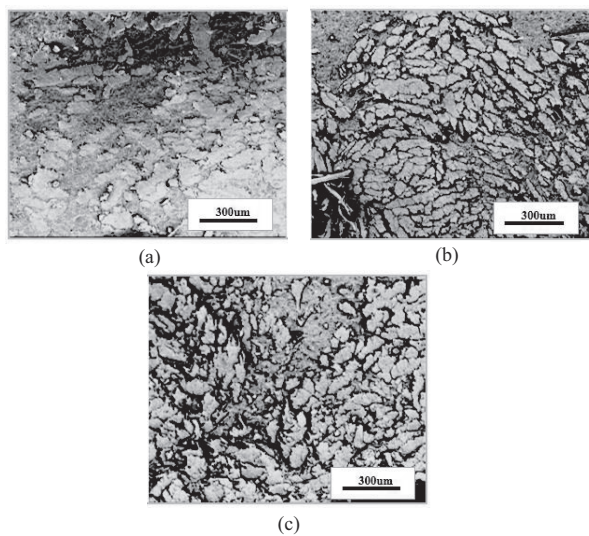
影响了拉伸强度的表现。



a—平纹组织; b—斜纹组织; c—方平组织

图10 不同织物组织直观对比图

由表5可知,该实验中影响复合材料弯曲强度的各因素主次顺序为 $A > B > C$,即织物组织 $>$ 经纱密度 $>$ 纬纱捻度。弯曲断裂时,因为最外层受力最大且变形量最大,所以最外层的树脂与粗纱纤维率先断裂。接着由于树脂断裂,粗纱纤维开始从树脂中拔出与断裂。在弯曲实验接触面上,由于最主要受力的还是纬纱,而在一部分截面中由于组织的不同,粗纱中的纤维从树脂中拔出的难易程度也不同,所以织物组织对弯曲强度的影响较大^[21]。图11为复合材料不同纬纱捻度SEM照片,图12为不同纬纱捻度组织直观图。

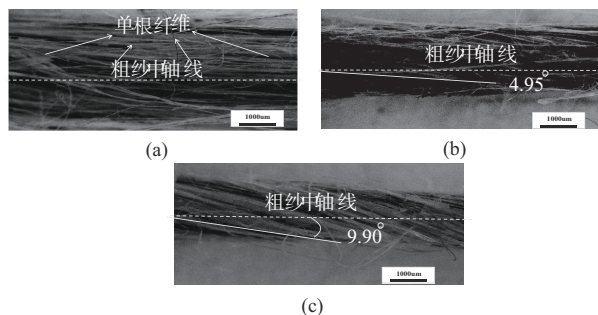


a—0捻/10 cm; b—2捻/10 cm; c—4捻/10 cm

图11 复合材料不同纬纱捻度SEM图

由图11、图12可知,当纬纱捻度为0捻/10 cm时,纬纱平行排列且比较疏松,树脂比较容易进入粗纱内部,树脂与粗纱的结合界面不明显;当捻度为2捻/10 cm时,纬纱纤维与中轴线夹角增大为 4.95° ,纬纱较为紧密,树脂与粗纱的结合界面较为明显;而当捻度为4捻/10 cm时,纬纱纤维与中轴线夹角

为 9.90° ,纬纱紧密导致树脂不容易进入粗纱内部,树脂与粗纱的结合界面很明显,这表明其与树脂结合程度差。因为弯曲时大部分受力为树脂与粗纱的结合体,所以在实验中采用0捻/10 cm粗纱的复合材料弯曲强度表现得更好。



a—0捻/10 cm; b—2捻/10 cm; c—4捻/10 cm

图12 不同经纱捻度组织直观图

综上所述,在采用以细度为 $(1\ 100 \pm 34.1)$ tex的粗纱为纬纱,以细度为50.5 tex的细纱为经纱制备的准单向预制件为增强体时,织物组织的变化(平纹、斜纹、方平)对复合材料拉伸和弯曲性能产生的影响最大。当织物组织为方平组织、经纱密度为60根/10 cm、纬纱捻度为4捻/10 cm时,拉伸强度最大,即复合材料关于拉伸强度的最优参数为 $A_1B_1C_3$;当织物组织为斜纹组织、经纱密度为40根/10 cm、纬纱捻度为0捻/10 cm时,弯曲强度最大,即复合材料关于弯曲强度的最优参数为 $A_2B_2C_1$ 。

3 结论

(1)在汉麻纤维的三种不同增强形式中,增强体为准单向汉麻粗纱以平纹方式织造所制得的复合材料的拉伸性能与弯曲性能最佳,其中拉伸强度为180.1 MPa,拉伸弹性模量为11.5 GPa,弯曲强度为229.5 MPa,弯曲弹性模量为24.1 GPa。

(2)相比于平纹汉麻粗纱织物与经向无固结的汉麻粗纱毡,准单向增强形式能更大程度地保留粗纱中纤维的取向与完整性,从而使制得的复合材料力学性能有明显的提升。

(3)根据选定3因素3水平的正交模拟计算方案,在采用以细度为 $(1\ 100 \pm 34.1)$ tex的粗纱为纬纱,以细度为50.5 tex的细纱为经纱制备的准单向预制件为增强体时,织物组织的变化(平纹、斜纹、方平)对复合材料拉伸和弯曲性能产生的影响最大。

(4)当织物组织为方平组织、经纱密度为60根/10 cm、纬纱捻度为4捻/10 cm时,拉伸强度最大,即复合材料关于拉伸强度的最优参数为 $A_1B_1C_3$;当织

物组织为斜纹组织、经纱密度为40根/10 cm、纬纱捻度为0捻/10 cm时,弯曲强度最大,即复合材料关于弯曲强度的最优参数为 $A_2B_2C_1$ 。

参考文献

- [1] Mohanty A K, Vivekanandhan S, Jean-Mathieu P, et al. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations[J]. *Science*, 2018, 362(6 414):536–542.
- [2] 张建春. 汉麻综合利用技术[M]. 北京: 长城出版社, 2006.
Zhang Jianchun. Comprehensive utilization technology of hemp [M]. Beijing: Changcheng Publishing House, 2006.
- [3] 芦长椿. 国内外天然纤维增强复合材料的技术进展[J]. 纺织导报, 2011(3):80–82, 84.
Lu Changchun. Technological progress of natural fiber reinforced composites at home and abroad[J]. *Textile Report*, 2011(3): 80–82, 84.
- [4] 荆妙蕾, 韩秀丽, 王春红, 等. 改性处理对汉麻秆粉/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2022, 50(3):99–105.
Jing Miaolei, Han Xiuli, Wang Chunhong, et al. Effect of modification on properties of Hemp stalk powder/polylactic acid composite [J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(3):99–105.
- [5] 潘宇涛, 常存, 赵金海, 等. 汉麻应用产品及优势研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(24):52–55.
Pan Yutao, Chang Cun, Zhao Jinhai, et al. Study on application products and advantages of hemp[J]. *Heilongjiang Science*, 2020, 11(24):52–55.
- [6] 周颖, 罗阳, 郭建兵, 等. 麻纤维增强聚丙烯复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(7):145–148.
Zhou Ying, Luo Yang, Guo Jianbing, et al. Research progress of hemp fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(7):145–148.
- [7] 郑科, 段盛文, 成莉凤, 等. 麻纤维增强热塑性复合材料的研究与应用[J]. 中国麻业科学, 2017, 39(6):312–320.
Zheng Ke, Duan Shengwen, Cheng Lifeng, et al. Research and application of hemp fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2017, 39(6):312–320.
- [8] Kiruthika A V. A review on physico-mechanical properties of bast fibre reinforced polymer composites[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 9. DOI:10.1016/j.jobe.2016.12.003.
- [9] 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*, 2016, 83:98–112.
- [10] Michael K. European hemp industry 2002[J]. *Journal of Industrial Hemp*, 2004, 9(2):93–101.
- [11] 展江湖, 王迎宵, 杨志浩, 等. 苧麻纤维增强聚乳酸复合材料性能研究[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7):1–9.
Zhan Jianghu, Wang Yingxiao, Yang Zhihao, et al. Study on properties of ramie fiber reinforced polylactic acid composites[J]. *Journal of Engineering Science*, 2021, 43(7):1–9.
- [12] 张永励, 李岩, 孙震. 织物形式对苧麻纤维渗透率及其复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2):195–200.
Zhang Yongli, Li Yan, Sun Zhen. Influence of fabric woven styles on the permeability and mechanical properties of ramie fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(2):195–200.
- [13] Usman A, Asra T, Yasir N. Comparison of mechanical behavior of biaxial, unidirectional and standard woven fabric reinforced composites[J]. *Fibers and Polymers*, 2020, 21(6):1 308–1 315.
- [14] Clémence C A, Benjamin S, Damien S, et al. Development of quasi-unidirectional fabrics with hemp fiber: A competitive reinforcement for composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55(4):551–564.
- [15] Wang Bo, Kento M, Nobuhide U, et al. Compressive failure analysis of quasi-isotropic composite laminates fabricated with quasi-unidirectional woven fabric[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(2):231–241.
- [16] Collet F, Khaled S, Prétot S, et al. First Step towards the upscaling of the production of washing fines -hemp composite. study of multiphysical properties[J]. *Construction Technologies and Architecture*, 2022, 6 357:558–584.
- [17] 鞠录岩. 纤维增强复合材料损伤研究综述[J]. 冶金与材料, 2020, 40(3):30, 32.
Ju Luyan. Review on damage of fiber reinforced composites[J]. *Metallurgy and Materials*, 2020, 40(3):30, 32.
- [18] 秦愈, 马崇启. 三向织物及其力学性能研究进展[J]. 丝绸, 2021, 58(2):35–45.
Qin Yu, Ma Chongqi. Research progress of three-direction fabric and its mechanical properties[J]. *Journal of Silk*, 201, 58(2):35–45.
- [19] 李岩, 罗业. 天然纤维增强复合材料力学性能及其应用[J]. 固体力学学报, 2010, 31(6):613–630.
Li Yan, Luo Ye. Mechanical properties and applications of natural fiber reinforced composites[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(6):613–630.
- [20] 汪浩, 徐珍珍, 阮芳涛, 等. 增强体织物组织结构对曲面复合材料力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(3):22–27.
Wang Hao, Xu Zhenzhen, Ruan Fangtao, et al. Effect of reinforced fabric structure on mechanical properties of curved surface composites[J]. *China Plastics*, 2019, 33(3):22–27.
- [21] Patil R B, Turukmane R, 朱瑜. 织物组织结构对机织物力学性能的影响[J]. 国际纺织导报, 2020, 48(3):30–32.
Patil R B, Turukmane R, Zhu Yu. Influence of fabric structure on material properties of woven materials[J]. *International Textile Review*, 2020, 48(3):30–32.