

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.07.012

苧麻织物铺层设计及化学改性对复合材料力学及界面性能影响

李鑫^{1,2}, 左祺², 徐磊², 张红霞²

(1. 天津工业大学财务处, 天津 300387; 2. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 为了提升复合材料的力学性能以及界面结合效果, 通过对不同铺层角度的不饱和聚酯树脂/苧麻织物(UPR/苧麻)复合材料力学性能进行研究, 从 0° , $\pm 45^\circ$ 和 90° 的角度组合中选择了最佳铺层设计方案; 利用碱处理、硅烷偶联剂处理以及碱+硅烷偶联剂联合处理分别对苧麻织物表面进行化学改性, 研究改性处理对复合材料的层间剪切性能和吸水性能的影响, 表征苧麻与UPR之间的界面结合情况。结果表明, 当UPR/苧麻复合材料中苧麻织物为沿 90° 纬向铺层时力学性能最优, 拉伸、弯曲和剪切强度分别比 0° 经向铺层的复合材料提高了42.7%, 34.3%, 27.1%。碱处理和偶联剂处理占纤维织物的质量分数分别是1%, 3%。碱处理+偶联剂联合处理复合材料的层间剪切性能比未处理、单独碱处理和单独偶联剂处理分别提高了23.6%, 26.0%, 10.7%。在浸泡96 h后, 联合改性复合材料的吸水率最小, 较未处理、单独碱处理和单独偶联剂处理的复合材料降低了28.5%, 23.2%, 16.2%。

关键词: 苧麻织物; 铺层设计; 联合改性; 复合材料; 界面性能

中图分类号: TB332, TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)07-0061-07

Effect of Ramie Fabric Laminate Design and Chemical Modification on Mechanical Properties and Interfacial Properties of Composites

Li Xin^{1,2}, Zuo Qi², Xu Lei², Zhang Hongxia²

(1. Finance Office, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties and interfacial properties, the unsaturated polyester resin/ramie fabric(UP/ramie) composites layered by different orientation angles were studied, and the optimum laminate design was selected from the combination of 0° , $\pm 45^\circ$ and 90° . Ramie fabrics were chemically modified by alkali treatment, silane coupling agent treatment and alkali treatment combined with silane coupling agent treatment. The effect of treatment on interlaminar shear and water absorption properties of the composites was studied and the interfacial bonding between ramie fabric and unsaturated polyester resin was characterized. The results show that the mechanical properties of UPR/ramie composites with ramie fabric plied along 90° (weft) direction are the best. Compared with 0° (warp) direction plied composite, the tensile, flexural and shear strength of the composites with 90° direction are 42.7%, 34.3% and 27.1% higher than 0° direction's. The optimum mass fraction of 1% alkali treatment and 3% coupling agent treatment is obtained by comprehensive analysis. The interlaminar shear properties of the composites treated by alkali treatment combined with coupling agent are 23.6%, 26.0% and 10.7% higher than those with untreated, only alkali treatment and only coupling agent treatment, respectively. After 96 h of immersion, the water absorption of the composite is the smallest, which is 28.5%, 23.2% and 16.2% lower than that of the composite with untreated, only alkali treatment and only coupling agent treatment.

Keywords: ramie fabric; laminate design; combined modification; composite; interfacial property

苧麻织物对比玻璃纤维以及碳纤维织物, 具有来源广、成本低、质量轻、密度小、绿色无污染、可循环利用以及生产能耗低等优点^[1]。苧麻对比黄麻、

剑麻等麻类纤维可纺性强, 性能良好并稳定, 纤维素比例高, 对比玻璃纤维等高性能纤维性能较弱, 但比强度、比模量与玻纤相近^[2]。从环境保护出发, 研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802205)

通讯作者: 徐磊, 副教授, 博士, 主要研究方向为天然纤维增强复合材料 E-mail: xulei@tiangong.edu.cn

收稿日期: 2020-04-20

引用格式: 李鑫, 左祺, 徐磊, 等. 苧麻织物铺层设计及化学改性对复合材料力学及界面性能影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7): 61-67, 79.

Li Xin, Zuo Qi, Xu Lei, et al. Effect of ramie fabric laminate design and chemical modification on mechanical properties and interfacial properties of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 61-67, 79.

人员采用苧麻纤维替代玻璃纤维以增强复合材料。如今,苧麻纤维增强复合材料在诸多工业领域得到了应用^[3],尤其在汽车内饰领域,广泛应用于内饰门板、顶棚、座椅、驾驶表盘等非承力结构^[4],另外在地面轨道交通以及航空航天等高性能领域正在逐渐推广。其中限制其更大范围应用的主要原因是麻纤维本身的力学性能较低以及与树脂界面结合性能较差。

在高性能纤维复合材料领域,为了合理利用纤维增强体承载性能,研究人员探究了高性能纤维的铺层角度对复合材料力学性能的影响^[5-6]。而在天然纤维领域对麻纤维增强复合材料的铺层设计关注较少。对铺层角度的研究集中在 0° , $\pm 45^\circ$ 和 90° ,单一方向的 0° 或 90° 拉伸性能较优, $\pm 45^\circ$ 复合材料的吸能效果较优^[7-8]。刘诚等^[9]研究了多种铺层方式对黄麻纤维增强复合材料力学性能的影响。当双向取向铺层时,在双向取向角为 $\pm 45^\circ$ 时复合材料的弯曲强度达到最大值为89.92 MPa。笔者设计了 0° , $\pm 45^\circ$ 和 90° 单向和双向取向的铺层角度组合方案,研究不同铺层角度对复合材料力学性能的影响。

复合材料力学性能除了与麻纤维本身的力学性能有关,也受纤维与基体的界面结合情况影响。当载荷可以通过界面进行传递时,界面结合效果最优。然而,麻纤维中纤维素的羟基基团较多,具有亲水性^[10],亲水性基团难以与树脂基体中的憎水性基团形成结合,导致纤维与基体的界面性能较差,使得纤维增强体不能完全发挥承载作用;另外,复合材料中纤维的亲水基团会通过不良界面,吸收水分并发生水合作用,导致复合材料厚度方向发生膨胀以及力学性能下降^[11-12]。针对此问题,纤维表面改性可改善复合材料的界面结合性能,化学方法是常见的改性方式,例如碱处理、硅烷偶联剂处理、表面活性剂处理等。王春红等^[13]采用碱+阻燃剂+硅烷偶联剂对聚乳酸/苧麻热固性复合材料进行化学改性,提高复合材料的力学性能和阻燃性能。李新功等^[14]通过碱处理+异氰酸酯调控了聚乳酸/竹纤维复合材料的界面情况,使界面结合状况改善并提高了力学性能。赵文杰等^[15]采用碱处理+阳离子活性剂处理对亚麻布与不饱和聚酯树脂(UPR)的复合材料进行改性,亚麻布的吸湿率下降了30.3%,同时复合材料的吸湿性降低了26%,其力学性能也有了一定的改善。倪爱清等^[16]用纳米 SiO_2 和

NaOH以及硅烷偶联剂对苧麻纤维进行改性,通过对改性后苧麻纤维化学结构、表面形貌、结晶度的探讨,揭示了苧麻纤维/乙烯基酯树脂复合材料力学性能提高以及吸湿性能降低的改性机理。化学改性可以提高天然纤维的疏水性能和树脂的浸润性能,联合改性可以改善复合材料的力学性能、界面性能和吸水性能。

为拓宽苧麻织物增强复合材料的应用领域,以及解决制约其发展的力学性能较低和界面结合差的问题,笔者进行苧麻织物的铺层设计,并研究铺层参数对UPR/苧麻织物(UPR/苧麻)复合材料力学性能的影响,从纤维尺度分析纤维化学联合改性对复合材料层间剪切性能以及吸水性能的影响,从而反映了纤维与基体的界面结合性能。

1 实验部分

1.1 实验材料

苧麻织物:机织平纹,面密度为 130 g/m^2 ,苧麻织物经向强力和纬向强力分别为367.2 N和475.2 N,湖南华升洞庭麻业有限公司;

UPR:HR-802,常州市华润复合材料有限公司;

氢氧化钠(NaOH)粉末:天津市风船化学试剂科技有限公司;

硅烷偶联剂:KH550,济南金辉化工有限公司。

1.2 仪器及设备

液压机:Y/TD71-45A型,天津液压厂;

鼓风干燥箱:DHG-9240A型,巩义市予华仪器有限公司;

万能强力机:Instron3369型,美国英斯特朗公司;

扫描电子显微镜(SEM):Phenom TM型,复纳科学仪器(上海)有限公司;

光学显微镜:VHX-1000型,上海基恩士国际贸易有限公司;

电子单纤强力仪:YG001A型,太仓纺织仪器厂;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50型,美国尼高力仪器公司。

1.3 实验方法

(1)不同铺层角度复合材料的制备。

按照苧麻纤维与UPR的质量比为30:70的比例,将UPR均匀涂抹到苧麻织物上,制得UPR/苧麻预浸料。通过铺层角度的设计,以4种不同铺

层角度铺放 8 层 UPR/ 苧麻预浸料,铺层方案见表 1,织物各方向的示意图如图 1 所示。

表 1 UPR/ 苧麻预浸料的铺层设计方案

试样编号	铺层角度方案	铺层方向
1 [#]	(0°)8 s	经向
2 [#]	(90°)8 s	纬向
3 [#]	(0°/90°)4 s	交叉(经向和纬向)
4 [#]	(0°/±45°/90°)2 s	米字型(经向、纬向和斜向)

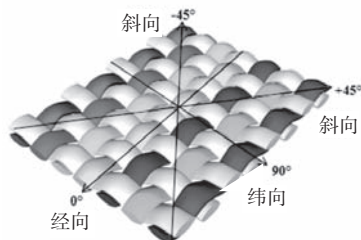


图 1 苧麻织物的角度方向示意图

最终将铺放好的预浸料通过压机模压工艺成型。先在常温 5 MPa 下模压,前 10 min 时每隔 5 min 卸压一次,以充分去除多余的气泡并且使树脂均匀浸润织物;然后在常温 5 MPa 下压制 2 h,取出置于 80℃电热恒温鼓风干燥箱中后固化 2 h。

(2) 苧麻织物化学改性。

碱处理:碱处理浓度(NaOH 占纤维的质量分数)分别为 1%、2% 和 3%,浴比(纤维织物与 NaOH 溶液的比例)1:20,温度为 100℃,每隔 15 min 搅拌一次,45 min 后用温水洗至中性,最后置于电热恒温鼓风干燥箱中 80℃烘干 2 h。

硅烷偶联剂处理:硅烷偶联剂浓度(硅烷偶联剂占纤维的质量分数)分别为 1%、3% 和 5%,浴比 1:20,常温下浸泡,每隔 15 min 搅拌一次,2 h 后置于 80℃的电热恒温鼓风干燥箱中 2 h。

碱 + 硅烷偶联剂联合处理:先按照碱处理的优选工艺进行处理,然后再按照硅烷偶联剂的优选工艺进行处理。

(3) 改性后 UPR/ 苧麻复合材料制备。

根据优选的铺层方案,将改性处理后的苧麻织物,制备成 UPR/ 苧麻预浸料,通过模压和后固化成型,工艺按照 (1) 操作。

1.4 性能测试

拉伸性能按照 ASTM D638-2014 测试,试样尺寸为 160 mm×12.5 mm×3 mm,拉伸速度为 5 mm/min,拉伸试样跨距为 90 mm。

弯曲性能按照 ASTM D790-2010 测试,试样尺寸为 60 mm×12.5 mm×3 mm,加载速度为 2 mm/min,弯曲试样跨距为 48 mm。

层间剪切强度按照 JC/T 773-2010 测试,试样尺寸为 30 mm×15 mm×3 mm,加载速度为 1 mm/min,剪切试样跨距为 15 mm。

采用 SEM 观察纤维的纵向形态和复合材料的拉伸断裂界面。

吸水性能按照 GB/T 1462-2005 测试,试样尺寸为 15 mm×15 mm×3 mm。首先在烘箱中以 80℃烘干 2 h,取出并称重,然后完全浸泡在蒸馏水中,最后隔 24 h 取出称重,称重前用吸水纸吸干试样表面水分,一共记录 96 h。

采用光学显微镜测试苧麻纤维的平均直径;

用电子单纤强力仪按照 ASTM D3822-2007 对单纤维的力学性能进行测试。夹持隔距设置为 10 mm,拉伸速度为 1 mm/min,量程为 200 cN。

采用 FTIR 仪对改性前后的苧麻纤维进行 FTIR 测试,分析研究其分子结构,在 400~4000 cm⁻¹ 范围进行扫描。

2 结果与讨论

2.1 铺层设计对复合材料力学性能的影响

为了设计轨道交通复合材料板材的整体铺层方案,首先应研究不同铺层方案对复合材料力学性能的影响,再对整体产品的铺层分布进行探究。根据 4 种铺层方案制备的 UPR/ 苧麻复合材料的力学性能如图 2 所示。由图 2a 可见,2[#] 纬向铺层复合材料的拉伸强度为 56.52 MPa 比最低的 4[#] 米字型铺层复合材料提高 54.5%,但 4 种铺层方案复合材料的拉伸弹性模量差距不大。由图 2b 看出,2[#] 复合材料弯曲性能最优,弯曲强度和弯曲弹性模量分别比 1[#] 经向铺层的分别提高 34.3%,24.1%。图 2c 看出,2[#] 复合材料的层间剪切强度最高。综合可知,2[#] 复合材料的力学性能最优,其拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别比 1[#] 复合材料提高了 42.7%,34.3%,27.1%。

2[#] 铺层的 UPR/ 苧麻复合材料的力学性能最优,由于苧麻织物经向强力和纬向强力分别为 367.2 N 和 475.2 N,纬向强力大于经向强力,织物沿拉伸方向的断裂强力越大,复合材料的拉伸性能越好。弯曲性能和剪切性能测试时的应力状态比较复杂,是拉伸、压缩、剪切和局部挤压等应力的综合表现^[17]。当强度较大的纤维方向与试样的长度方向一致时,更有利于应力的传递,织物纬向方向的力学性能较大,因而纬向铺层复合材料的力学性能最大。3[#] 复合材料的拉伸性能和弯曲性能对比 1[#] 和 4[#] 较好,

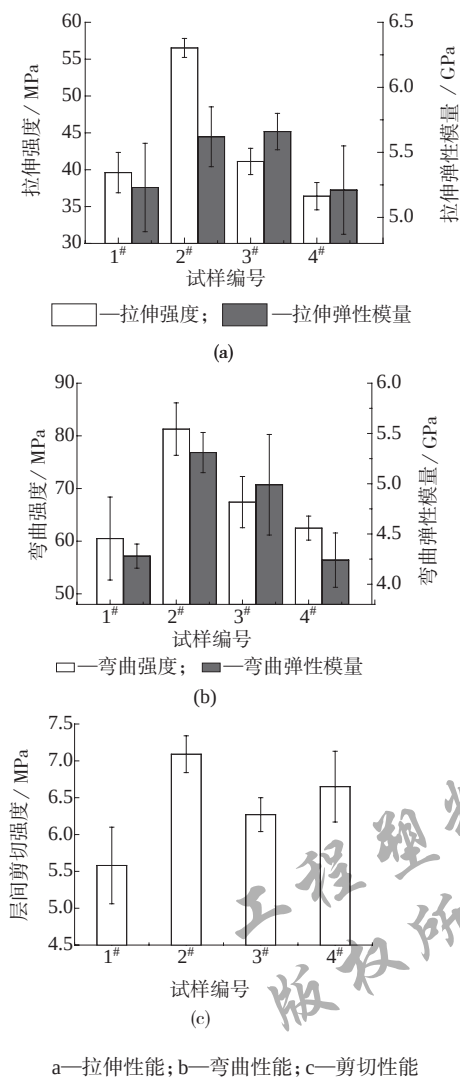


图2 不同铺层角度对苧麻/UPR复合材料力学性能的影响

但低于2#, 经向和纬向的交叉铺层降低了复合材料在垂直和水平方向上的各向异性, 提高了纤维分布的均匀性, 3#复合材料的力学性能优于1#复合材料。1#和4#复合材料的力学性能都不高, 1#复合材料是因为在织造过程中对经向纱线造成了损伤, 织物经向力学性能低于纬向, 复合材料的力学性能与织物性能有关, 使得1#复合材料力学性能较低。对于4#复合材料来说, 沿拉伸方向, 复合材料中有一半的载荷不能直接作用在纤维方向上, 载荷通过经纬纱线交织点的摩擦力和经纬方向上的分力来传递, 因此其拉伸性能在全部铺层设计中最差。然而, 45°的纤维排布限制了在叠层复合后层间产生相对位移, 产生抵抗阻力, 因此在材料内部产生了应力, 从而导致4#复合材料的层间剪切强度高于3#和1#。

2.2 碱处理对复合材料界面性能的影响

碱处理苧麻纤维的目的是去除纤维表面的半

纤维素、果胶、杂质等小分子物质, 并使得纤维表面因出现了沟槽和裂纹而变得粗糙^[13]。未处理纤维和碱处理后纤维的SEM照片如图3所示。未处理纤维上的杂质较多, 影响纤维与树脂的直接接触。纤维经过碱处理后, 杂质被基本去除, 且表面沟壑增加, 提高了纤维的比表面积, 增加了树脂浸润纤维的通道, 理论上有利于纤维与树脂的接触。

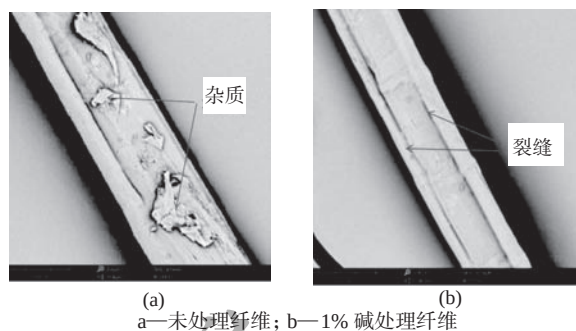


图3 未处理及碱处理后苧麻纤维的表面SEM照片

碱处理后苧麻纤维的FTIR谱图如图4所示。—OH基团的吸收峰出现在3332 cm⁻¹处, 碱处理后的波峰面积相对增加。由图4可知, 碱处理苧麻纤维表面除纤维素外的小分子物质被去除。1492 cm⁻¹处是C=O的伸缩振动吸收峰, 属于半纤维素的特征吸收峰; 木质素中特有的C—O伸缩振动吸收峰在1243 cm⁻¹处。碱处理后苧麻纤维半纤维素和木质素的红外光透过率提高, 其特征峰的强度减弱, 说明碱处理对半纤维素和木质素确实有去除作用。经过碱处理后苧麻纤维没有出现新的波峰, 说明碱处理只对苧麻纤维表面进行物理处理。

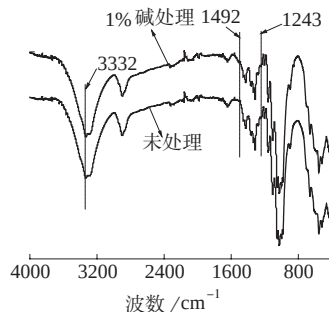


图4 1%碱处理的苧麻纤维表面基团的FTIR谱图

苧麻织物作为增强体, 纤维与树脂的结合是纱线整体甚至是织物整体的结合形式, 因此采用层间剪切强度来宏观地表示UPR/苧麻复合材料层与层之间的粘接强度^[18], 从而表示复合材料的界面性能。图5为不同碱含量改性UPR/苧麻复合材料层间剪切强度。

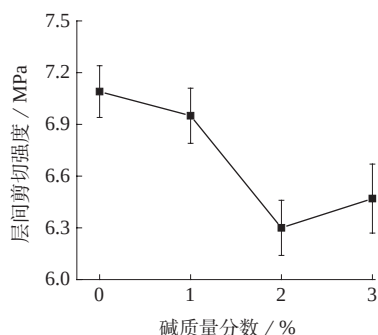


图5 不同碱含量改性UPR/苧麻复合材料层间剪切强度

由图5可见,经过碱改性后的UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度有所降低。纤维由原纤束组成,碱处理后纤维会分裂成更小的原纤,提高了比表面积,增加了纤维与树脂基体的接触面积。但过度的碱处理会对UPR/苧麻复合材料的力学性能产生负作用,这是因为碱液对纤维素有一定的分解作用,对纤维内部的主承力结构造成破坏。碱处理对苧麻纤维进行改性后的纤维性能变化见表2。经过1%碱处理后苧麻纤维的直径变小,且碱处理后平均单纤维强力为414.69 MPa,比未处理的单纤维强力提高了18.3%;经过碱处理后的UPR/苧麻复合材料的拉伸强度为53.01 MPa,比未处理的复合材料降低了6.2%。

表2 1%碱处理和3%偶联剂处理的苧麻纤维及其复合材料性能

处理方式	纤维直径 / μm	单纤维断裂强度 / MPa	复合材料拉伸强度 / MPa
未处理	25 ~ 41	350.62	56.52
1% 碱处理	23 ~ 40.5	414.69	53.01
3% 偶联剂处理	21 ~ 36	448.82	61.01

综合分析,经过碱处理后纤维强力提高,但复合材料的力学性能下降,可以推断碱处理后表面的羟基活性增加,亲水性能增强。虽然碱处理后纤维表面变得粗糙,杂质被去除,沟壑增多,但是由于羟基的存在,疏水性树脂无法渗入纤维表面沟壑中,无法发挥碱处理的作用,导致界面结合效果不好,剪切强度下降。结合碱处理对纤维性能的影响,碱的质量分数可选择为1%,使其对纤维性能起到积极的作用,并保证联合改性中能够充分发挥偶联剂的作用。

2.3 偶联剂处理对复合材料界面性能的影响

图6为不同偶联剂含量处理的UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度。从图6可以明显看出,当偶联剂质量分数为3%时,UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度有明显的增加,比未处理的复合材料提高了11.6%,界面效果提高。由表2可见,经过

偶联剂处理,纤维直径变小,且平均单纤维强力相比于未处理的纤维提高了28.0%,比碱处理效果好;偶联剂处理后的UPR/苧麻复合材料的拉伸强度61.01 MPa,较未处理的提高了7.9%,对复合材料力学性能起积极作用。

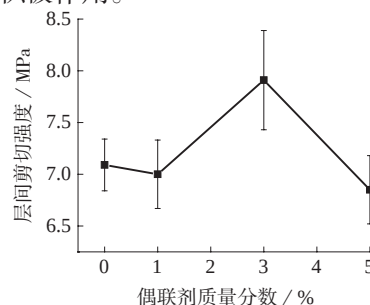


图6 不同偶联剂含量改性的苧麻/UPR复合材料层间剪切强度

图7为3%偶联剂改性苧麻纤维的表面形貌的SEM照片。从图7可看出,对比未处理的纤维(图3a),偶联剂处理后的纤维表面存在颗粒状物质,纤维变得粗糙。并且偶联剂是疏水物质,包裹在纤维表面后,能促进纤维与基体相容。

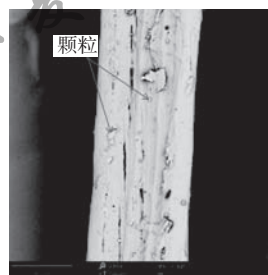


图7 3%偶联剂改性苧麻纤维的表面形貌的SEM照片

图8为偶联剂改性苧麻纤维与未处理的苧麻纤维的FTIR谱图。从图8可以看出,经过偶联剂处理的苧麻纤维的FTIR谱图上3327 cm^{-1} 处—OH基团的吸收峰明显减弱,揭示偶联剂在苧麻纤维表面与—OH结合形成化学键,消耗—OH基团。加入的偶联剂与苧麻纤维产生化学反应,消耗纤维表面的亲水基团,提高苧麻纤维疏水性,从而提高复合材料的界面结合性。

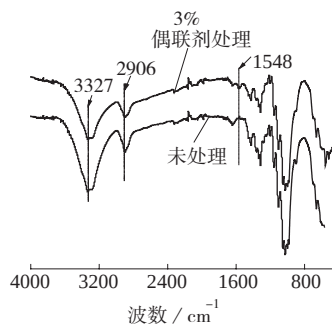


图8 3%偶联剂处理改性的苧麻纤维的影响

另一方面,图8中经偶联剂处理的苧麻纤维的FTIR谱图出现了新的特征吸收峰 1548 cm^{-1} ,与 —NH_2 的伸缩振动吸收峰相对应; 2906 cm^{-1} 附近的双重峰为甲基、亚甲基的 C—H 伸缩振动吸收峰,相对于未处理纤维有所下降。硅烷偶联剂KH550在FTIR谱图中可见 —NH_2 的伸缩振动吸收峰。苧麻纤维的表面羟基与偶联剂基团发生化学反应产生新基团,纤维和基体之间以化学键形成了牢固的网络结构,纤维亲水性下降,减少了溶胀效果,因此经过偶联剂改性的UPR/苧麻复合材料的界面结合性能以及力学性能也得到改善。

2.4 联合改性对复合材料的界面性能影响

UPR/苧麻复合材料界面性能可以通过对苧麻织物的碱处理+偶联剂联合处理改性实现进一步改善。图9为不同改性方式改性的UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度。由图9可见,经过联合改性后的UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度明显提高,1%碱+3%偶联剂联合改性后UPR/苧麻复合材料的层间剪切强度为 8.76 MPa ,相比未处理、单独碱处理和单独偶联剂处理分别提高了23.6%,26.0%,10.7%。

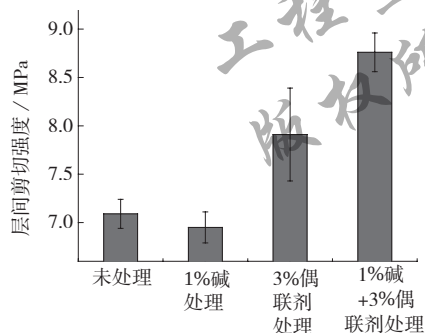
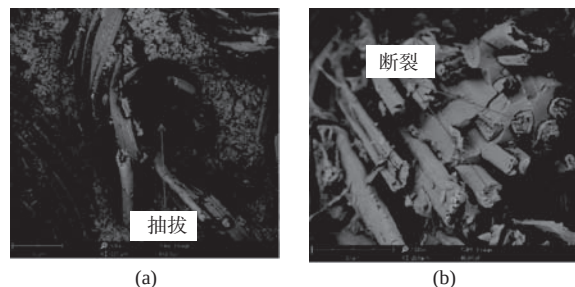


图9 不同改性方式的苧麻/UPR复合材料层间剪切强度

图10为碱与偶联剂改性后的UPR/苧麻复合材料断面的SEM照片。由图10可以看出,未处理的复合材料断面中,纤维从树脂中抽拔出来,证明界面效果不好。而经过1%碱+3%偶联剂的联合改性后,UPR/苧麻复合材料的基体均匀包围纤维,原有的界面被树脂填充,纤维呈脆性断裂。

通过碱处理,纤维溶胀,提高纤维素内部非结晶区的可及性,暴露出更多的游离羟基,使得偶联剂进入纤维素内部的无定形区,与羟基发生化学反应,降低纤维表面的亲水效果。虽然经过初步的碱处理后,羟基阻碍UPR进入纤维的沟壑和缝隙中,导致UPR/苧麻复合材料力学性能下降,但是经过与偶联剂联合改性纤维,改善了纤维表面的疏水性,使纤维

与树脂的润湿效果提高,更好地发挥了碱处理的作用。



a—未处理;b—1%碱+3%偶联剂处理

图10 未处理及碱与偶联剂改性后的UPR/苧麻复合材料断面的SEM照片

2.5 化学改性对复合材料吸水性能的影响

复合材料的吸水性能取决于复合材料界面结合效果,若纤维与基体结合不紧密,水分子则会通过纤维与基体间的空隙传递到复合材料中,使其在厚度方向上发生膨胀,造成天然纤维复合材料板材尺寸不稳定,且复合材料的力学性能下降^[19]。因此为了降低吸水性能,提高复合材料的尺寸稳定性和力学性能,需要通过化学改性改善复合材料的界面。

图11为不同处理方式的UPR/苧麻复合材料吸水性能。

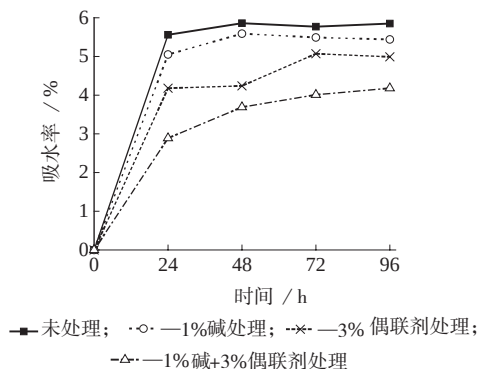


图11 不同化学改性的UPR/苧麻复合材料吸水性能

由图11可见,经过3种化学改性方式可得出1%碱+3%偶联剂联合改性的UPR/苧麻复合材料吸水性能最低,较未处理、单独碱改性和单独偶联剂改性复合材料的吸水性能分别降低了28.5%,23.2%,16.2%。联合改性复合材料的吸水率最低,证明水分子通过纤维与基体的紧密界面渗透进复合材料的速率最慢。经过1%碱处理后的UPR/苧麻复合材料与未处理的复合材料的吸水性能无变化,经过3%偶联剂处理的复合材料吸水性能有明显的降低,并且吸水率变化比较缓慢。由此也反映了联合改性对复合材料的界面改性最有效,明显提高了纤维与基体的界面结合效果,其次是偶联剂改性,该

趋势与层间剪切强度一致,也证明了根据吸水性能反映复合材料界面性能是可行的。

3 结论

(1) 在 0° , 90° , $0^\circ/90^\circ$ 和 $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ 的 4 种铺层设计中,由于其 90° 纬向织物本身优异的力学性能,纬向铺层的 UPR/苧麻复合材料的力学性能明显高于其它三种设计的复合材料。在层间剪切强度的测试中, $\pm 45^\circ$ 的铺层限制 0° 和 90° 的织物位移,使得复合材料的层间结合较好,层间剪切强度较高。

(2) 结合碱处理、偶联剂处理 UPR/苧麻复合材料力学性能以及纤维尺度层面的直径和单纤维强力测试结果,优化可得 1% 碱和 3% 硅烷偶联剂联合处理是苧麻纤维较为适宜的改性方法。复合材料的层间剪切强度比未处理的提高了 23.6%,宏观反映了联合改性有利于纤维与树脂的界面结合,并且界面改性效果优于单一的碱改性或者偶联剂改性。

(3) 由联合改性复合材料的吸水率最低可得,联合改性纤维的 UPR/苧麻复合材料界面结合最优。UPR/苧麻复合材料吸水性能最低,比未处理的下降了 28.5%,联合改性后 UPR/苧麻复合材料界面性能和吸水性能的改善有利于促进 UPR/苧麻复合材料在轨道交通等领域中的应用,提高了板材的承载能力与尺寸稳定性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Joshi S V, Drzal L T, Mohanty A K, et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2004, 35(3):371–376.
- [3] Sun Z Y. Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2019, 25(5):835–846.
- [4] Ahmad F, Choi H S, Park M K. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2015, 300(1):10–24.
- [5] 陈萍,赵月青,陈菲,等. 单向碳纤维/环氧树脂预浸料叠层的面内变形行为[J/OL]. 复合材料学报, 2020, 37(5):1 049–1 055.
Chen Ping, Zhao Yueqing, Chen Fei, et al. In-plane deformation behavior of the unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg layups[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5):1 049–1 055.
- [6] 李静雯,张博明,孙义亮,等. 不同铺层方式下连续玻璃纤维/聚丙烯复合材料波纹夹芯板的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5):1 074–1 082.
- [7] 赖家美,鄢冬冬,刘榆华,等. VARTM 工艺铺层取向对复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(1):43–47.
- [8] 解江,马骢瑶,霍雨佳,等. 纤维铺层角度对复合材料薄壁圆管轴向压溃吸能特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20):205–211.
- [9] 刘诚,范豪,花军,等. 铺层取向角度对黄麻纤维复合材料性能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(2):52–55.
- [10] John M J, Thomas S. Biofibres and biocomposites[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(3):343–364.
- [11] Li Y, Hu Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene(HDPE) composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(4):570–578.
- [12] Li Y, Xue B. Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 126:144–158.
- [13] 王春红,任子龙,李姗,等. 苧麻织物表面改性对其增强热固性聚乳酸复合材料力学及阻燃性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015 32(2):444–450.
- [14] 李新功,郑霞,吴义强. 竹纤维/聚乳酸复合材料界面调控[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4):94–98.
- [15] 赵文杰,胡求学,闫雯玲,等. 改性亚麻布/不饱和聚酯复合材料的吸湿及力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):35–43.
- [16] 赵文杰,胡求学,闫雯玲,等. 改性亚麻布/不饱和聚酯复合材料的吸湿及力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):35–43.
- [17] 王春红,任子龙,李姗,等. 苧麻织物表面改性对其增强热固性聚乳酸复合材料力学及阻燃性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015 32(2):444–450.
- [18] Wang Chunhong, Ren Zilong, Li Shan, et al. Effect of surface modification on properties of mechanical and flame retardant of ramie fabrics reinforced thermosetting polylactic acid composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2):444–450.
- [19] Li Xingong, Zheng Xia, Wu Yiqiang. Interface control of bamboo fibers / polylactic acid composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4):94–98.
- [20] 赵文杰,胡求学,闫雯玲,等. 改性亚麻布/不饱和聚酯复合材料的吸湿及力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):35–43.
- [21] Zhao Wenjie, Hu Qiuxue, Yan Wenling, et al. Moisture absorption

- Sun Jin, Li Yongquan, Li Feng. Effect of the injection molding processing parameters on automobile bumper warpage deformation[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(5):49-53.
- [8] 于同敏. 注射制品内应力分析及控制对策 [J]. 模具工业, 1998, 2(8):39-44.
- Yu Tongmin. Analysis of internal stress of injection products and control countermeasures[J]. Die and Mould Industry, 1998, 2(8):39-44.
- [9] 杨风霞, 王爱荣, 许光日, 等. 工艺参数对 ABS、PP 注塑件翘曲变形影响的对比研究 [J]. 塑料工业, 2008, 36(3):43-46.
- Yang Fengxia, Wang Airong, Xu Guangri, et al. Comparative study on effect of process parameter on warpage of ABS and PP injection molded parts[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(3):43-46.
- [10] Chang R Y, Tsaur B D. Experimental and theoretial studied of shrinkage, warp and sink marks of crystalline polymer injection molded parts[J]. Polymer Engineering and Seience, 1995, 35(15):2 115-2 221.
- [11] 王利霞, 杨杨. 注塑成型工艺对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化 [J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(2):173-176.
- Wang Lixia, Yang Yang. Investigation of the influence of processing parameter on volumetric shrinkage variation of plastic injection molded parts and process optimization[J]. Polymer Material Science and Engineering, 2004, 20(2):173-176.
- [12] Oktem H, Erzummlu T, Uzman I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding proecess parameters for a thin-shell part[J]. Materials and Design, 2005.10.1016/j.matdes.2005.12.013.
- [13] 吴贵生, 于治福. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- Wu Guisheng, Yu Zhifu. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [14] 马浩军, 胡广洪, 阮雪榆. 利用 Moldflow 软件分析解决注塑件翘曲问题 [J]. 模具技术, 2005(5):55-58.
- Ma Haojun, Hu Guanghong, Ruan Xueyu. Using Moldflow software to analyze and solve the problem of the warp of injection molding parts[J]. Die and Mould Technology, 2005(5):55-58.
- [15] 茆茂, 朱先琦. 基于正交试验法的镜框注塑工艺参数优化 [J]. 南昌工程学院学报, 2015, 34(3):51-55.
- Mao Mao, Zhu Xianqi. Optimization of injection molding process parameters of mirror frame based on orthogonal test[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2015, 34(3):51-55.
- (上接第 67 页)
- and mechanical property of modified linen/unsaturated polyester composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1):35-43.
- [16] 倪爱清, 朱坤坤, 王继辉. 纳米 SiO_2 -NaOH-有机硅烷偶联剂表面改性对苧麻纤维/乙烯基酯树脂复合材料的性能影响 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(11):2 579-2 586.
- Ni Aiqing, Zhu Kunkun, Wang Jihui. Effects of nano SiO_2 -NaOH-silane coupling agent surface treatment on behavior of ramie fiber / vinyl ester resin composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(11):2 579-2 586.
- [17] 张汝光. 复合材料层合板的弯曲性能和试验 [J]. 玻璃钢, 2009(3):1-5.
- Zhang Ruguang. Bending properties and tests of composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2009(3):1-5.
- [18] 李稳. 基于纤维束复合材料测试的单向层合板层间性能的预估方法 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Li Wen. Prediction method for interlaminar performance of unidirectional laminates based on fiber bundle composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [19] Ahmalthirmizir M Z, Mohdishak Z A, Mattaib R, et al. Mechanical, water absorption and dimensional stability studies of kenaf bast fibre-filled poly (butylene succinate) composites[J]. Journal of Macromolecular Science: Part D -Reviews in Polymer Processing, 2011, 50(4). DOI:10.1080/03602559.2010.531871.