

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.04.019

苧麻纤维增强复合材料的光老化性能

陈旭^{1,2}, 刘燕峰³, 刘青曼¹, 益小苏^{1,2}

[1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300; 2. 中航复材(北京)科技有限公司, 北京 101300;

3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095]

摘要: 制备了苧麻纤维增强不饱和聚酯复合材料, 放置于荧光紫外灯下和氙弧灯下加速老化。测试老化后的弯曲性能, 通过弯曲性能的退化规律推断复合材料的老化规律, 并通过其他分析手段, 研究苧麻纤维增强不饱和聚酯复合材料的老化机理。测试结果表明, 在荧光紫外灯照射的 600 h 内, 复合材料的力学性能下降约 30%; 在氙弧灯照射的 1200 h 内, 复合材料的力学性能表现为先上升后下降, 再上升又下降的过程, 弯曲强度最终下降约 12%, 并伴随着质量损失、表面黄变以及表面开裂的现象。

关键词: 苧麻纤维; 复合材料; 光老化; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)04-0098-06

Photoaging Properties of Ramie Fiber Reinforced Composites

Chen Xu^{1,2}, Liu Yanfeng³, Liu Qingman¹, Yi Xiaosu^{1,2}

[1. AVIC Composite Corporation Ltd, Beijing 101300, China; 2. ACC (Beijing) Science and Technology Co., Ltd, Beijing 101300, China;

3. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China]

Abstract: Ramie fiber reinforced unsaturated polyester composite specimens were put in the ultraviolet ageing test chamber and the Xenon ageing test chamber after prepared. After a few hundred hours, their flexural properties were tested. According to the test results, the degradation laws of mechanical properties of the composite were established. Then some other testing methods were carried out to determine the ageing principle of the ramie fiber reinforced unsaturated polyester composite. The results indicate that the flexural properties of the composite are decreased by 30% within 600 h of the ultraviolet exposure. During the 1200 h of Xenon exposure, the flexural properties of the composite rise first and then fall, then rise again and fall again, the flexural properties of the composite is decreased by 12% eventually, along with massive decreasing, surface yellowing and surface cracking.

Keywords: ramie fiber; composites; photoaging; mechanical property

苧麻纤维增强复合材料作为一种“新”兴复合材料, 成为近年来复合材料研究领域的热点。苧麻作为一种种植了几千年的作物, 对我们来说并不新鲜。但苧麻纤维作为一种增强材料使用在不同树脂基体中, 近几年才开始走进人们的视线^[1-2]。人们的研究热点集中在几个领域: 一是苧麻纤维的表面改性, 如何去除苧麻表面的半纤维素、果胶等成分, 改善复合材料的界面^[3-4], 从而提高苧麻纤维增强复合材料的力学性能^[5-6]。二是苧麻纤维复合材料吸水性或者耐湿热的研究^[7-8], 由于苧麻纤维截面为中空结构, 有吸水的特性, 研究其耐湿热的特性,

系统研究苧麻纤维增强复合材料在湿热环境下的吸湿性能及其力学性能的退化规律与机理^[9], 对促进苧麻纤维增强复合材料在实际工程结构中的安全、可靠应用具有重要的意义^[10]。三是苧麻纤维与其他纤维混杂铺层复合材料在不同应用领域中特性研究, 如苧麻纤维和玻璃纤维混杂铺层复合材料, 在满足力学性能要求的同时, 密度相较于纯玻璃纤维增强复合材料又有明显降低^[11-12], 又如苧麻纤维和碳纤维混杂铺层复合材料, 在满足力学性能要求的同时, 又有阻尼减振效果^[13]。此外, 除了对苧麻纤维的研究, 其它麻纤维如亚麻^[14-16]、黄麻纤维^[17-20], 也

通信作者: 陈旭, 工程师, 主要从事高分子复合材料研究 E-mail: 15901014359@qq.com

收稿日期: 2021-01-27

引用格式: 陈旭, 刘燕峰, 刘青曼, 等. 苧麻纤维增强复合材料的光老化性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(4): 98-103.

Chen Xu, Liu Yanfeng, Liu Qingman, et al. Photoaging properties of ramie fiber reinforced composites [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4): 98-103.

是近年研究热点,亚麻纤维湿热老化性能^[15-16]、黄麻纤维的表面改性^[19-20],都有不少研究内容。

不饱和聚酯基苧麻纤维增强复合材料将会被使用在各领域的室内外材料中。其使用过程中会受到内外因素的综合影响。参考聚酯玻璃纤维复合材料的老化表现,在材料表面会出现颜色变黄、部分树脂脱落等现象,更严重会导致力学性能退化,直至丧失使用价值;除了聚酯基体的老化,复合材料的增强纤维也同样面临着老化,与常见的合成纤维(碳纤维、玻璃纤维)不同,天然纤维的耐候性较差,在紫外线长期的照射下,材料从微观结构到化学组成都会发生改变,从而影响到纤维的力学性能;除此之外,复合材料的老化还涉及到复合材料的成型工艺,如固化时间、温度、压力及后处理工艺,成型后材料中的气泡和孔隙的分布,再加上环境因素的复杂性,都给复合材料老化增加了影响因素。

老化试验通常有两种方式实现,一种是自然气候暴露试验,一种是室内加速老化试验,前者可以更真实反映出材料实际使用环境的情况,反映出的性能衰退和使用寿命也最准确,但试验周期过长,执行起来有困难,后者通过模拟并强化主要环境因子,可以在较短的时间内对材料的耐候性能做出评价,且试验结果重现性好。

笔者制备了苧麻纤维增强不饱和聚酯复合材料,研究了复合材料的光老化性能和老化机理。老化试验都采用室内加速老化。

1 实验部分

1.1 主要原材料

苧麻纤维织物:规格为 21×21 英支,面密度约为 140 g/m²,体密度约为 1.55 g/m³,湖南株洲;

不饱和聚酯:Synolite 9001-I-1,金陵帝斯曼树脂有限公司;

不饱和聚酯固化剂:Synolite 5002-M-2,金陵帝斯曼树脂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电子万能试验机:Instron5900 型,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司;

紫外老化箱:UVTest 型,美国亚太拉斯材料测试技术公司;

氙灯老化箱:Xi5000 型,美国亚太拉斯材料测试技术公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 170X

型,美国尼高力仪器公司;

台式分光光度计(测黄度值设备):Color-Eye 7000A 型,爱色丽(上海)色彩科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-IT800 型,捷欧路(北京)科贸有限公司。

1.3 复合材料制备

苧麻纤维织物在 80℃下烘干 2 h,然后将织物平整的铺覆在模板上。

用密封条和真空袋将贴好的织物完全包裹,并抽真空,在真空环境中预压 1 h。

再将混合好的不饱和聚酯和固化剂吸入真空袋中,并在常温下保持 30 min~1 h。

放入烘箱,分阶段升温固化,60℃和 80℃各 1 h,冷却至室温,拆下真空袋得到苧麻纤维织物增强不饱和聚酯复合材料层合板。

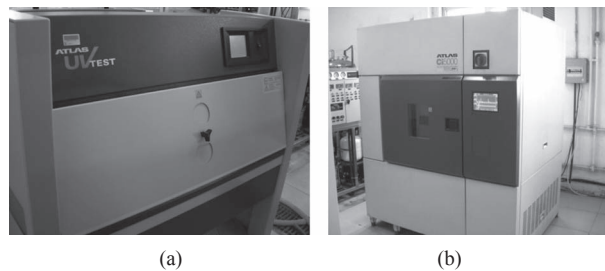
1.4 性能测试

荧光紫外灯的快速筛选试验:使用亚太拉斯紫外老化箱(见图 1a),根据 GB/T 16422.3-1997 进行测试,测试条件见表 1。

表 1 荧光紫外灯测试条件

周期	辐照度 / (W·m ⁻²)	黑板温度 / °C	时间 / h
光照周期	0.76(340 nm)	60	8
冷凝周期	-	50	4

氙弧灯人工加速老化试验:使用亚太拉斯氙灯老化箱(见图 1b),根据 GB/T 16422.2-1999 测试,测试条件见表 2,辐照度在 300~400 nm 下测得。



(a) a—紫外老化箱; b—氙灯老化箱

图 1 亚太拉斯紫外老化箱和氙灯老化箱

表 2 氙弧灯测试条件

周期	辐照度 / (W·m ⁻²)	黑板温度 / °C	室温 / °C	相对湿度 / %	时间 / min
光照周期	60	65	38	50	102
光照 + 喷淋	60	65	38	50	18

复合材料力学性能在材料电子万能试验机上测试。复合材料的弯曲样条为 80 mm×15 mm,数量为 5 条,测试标准为 GB/T 1449-2005。

复合材料的黄色指数根据 HG/T 3862-2006

测定,是塑料对国际照明委员会(CIE)标准C光源,以氧化镁为基准的黄色值。黄色指数(Y_I)用式(1)表示:

$$Y_I = 100(1.28X - 1.06Z) / Y \quad (1)$$

式中: X, Y, Z 分别为所测得的三刺激值。经仪器自动积分求得试样相对于标准照明体C的光谱三刺激值 X, Y, Z 。如是正值表示材料呈现黄色,负值则表示材料呈现蓝色。

动态力学性能测试:用X型动态热力学分析仪,测定动态力学性能温度谱。试样尺寸 $35\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

FTIR测试:采用KBr压片法,将复合材料磨成粉末与KBr(按1:50质量比)混匀并压片,用FTIR仪进行检测分析,频谱范围 $4000 \sim 450\text{ cm}^{-1}$ 。

采用SEM对复合材料截面进行观察。

2 结果与讨论

2.1 荧光紫外灯的快速筛选试验

从理论上说,荧光紫外灯的光谱主要分布在 $295 \sim 360\text{ nm}$,这种短波是引起老化的主要因素,增加这部分能量,可以达到较高的加速倍率,可以实现对特定材料的快速筛选。但需要注意的是,荧光紫外灯中还有自然日光中没有的辐射能量,而且紫外灯中没有高于 375 nm 的较长波长的UV能量,这些缺陷会导致试验结果的模拟性较差。

试验时间跨度为0到600 h,约60 h取出一批试样,用于弯曲性能的测试,测试结果见表3。

表3 不同紫外老化时间下复合材料弯曲性能

老化时间 / h	弯曲强度 / MPa	弯曲强度变化率 / %	弯曲弹性模量 / GPa	弯曲弹性模量变化率 / %
0	94.7	0.00	8.42	0.00
60	85.3	-9.93	7.46	-11.40
132	82.6	-12.78	6.97	-17.22
180	81.9	-13.52	7.21	-14.37
240	74.1	-21.75	6.68	-20.67
300	73.3	-22.60	6.96	-17.34
360	73.0	-22.91	6.71	-20.31
470	67.5	-28.72	6.32	-24.94
500	65.0	-31.36	6.29	-25.30
560	67.3	-28.93	6.60	-21.62
600	68.9	-27.24	6.33	-24.82

图2为不同紫外老化时间下复合材料的弯曲性能。由图2可以看出,弯曲强度随着紫外老化时间的增加呈下降趋势,300 h之内下降趋势较明显,老化时间超过400 h之后,弯曲强度的下降趋于平缓,下降百分比约为30%。图3为紫外老化后试样的颜色变化照片。

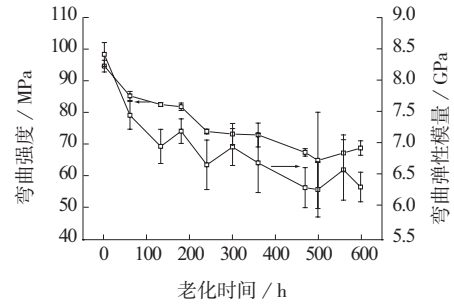


图2 不同紫外老化时间下材料弯曲性能

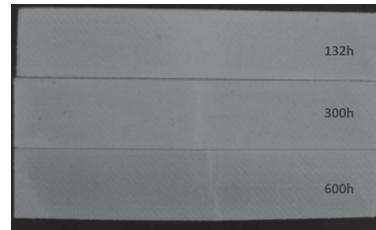


图3 紫外老化后试样的颜色变化照片

由图3紫外老化试样的颜色可以看到,试样在光老化过程中会出现变黄现象,原因是在紫外光的照射下,不饱和聚酯出现光降解的过程。因此在之后的试验中增加 Y_I 的测试,从外观颜色表征试样的老化过程。

2.2 氙弧灯人工加速老化试验

目前认为,已知的人工光源中氙弧灯的光谱能量分布与阳光中紫外、可见光部分最相似。通过选择合适的滤光片,可以滤去大部分到达地面阳光中存在的短波辐射。由于氙弧灯老化的老化加速倍率比紫外老化加速倍率低,且600 h后的试样弯曲性能也没有下降60%,因此将试验时间增加到1200 h。试验时间跨度为0到1200 h,约100 h取出一批试样,用于弯曲性能的测试,测试结果见表4。

表4 不同氙弧灯老化时间下复合材料弯曲性能、质量损失及 Y_I 值

老化时间 / h	弯曲强度 / MPa	弯曲强度变化率 / %	弯曲弹性模量 / GPa	弯曲弹性模量变化率 / %	质量损失率 / %	Y_I
0	92.5	0.00	8.44	0.00	0	14.9
100	92.3	-0.22	8.24	-2.37	0.44	17.8
200	94.3	1.95	8.20	-2.84	0.15	18.5
300	94.0	1.62	7.73	-8.41	0.41	19.0
400	86.0	-7.03	7.42	-12.09	0.78	18.7
500	83.2	-10.05	7.35	-12.91	1.00	20.5
600	80.8	-12.65	6.86	-18.72	0.74	20.5
700	88.0	-4.86	7.49	-11.26	0.53	21.0
800	90.1	-2.59	8.17	-3.20	0.57	19.8
900	87.8	-5.08	7.68	-9.00	0.40	18.6
1000	89.3	-3.46	7.80	-7.58	0.40	17.6
1100	85.3	-7.78	7.74	-8.29	0.65	18.9
1200	81.3	-12.11	6.91	-18.13	0.48	17.5

图4为氙灯老化时间与弯曲强度、弯曲弹性模量曲线。由图4来看,试样在氙灯老化过程中,经历了弯曲强度略上升、下降、再上升、又下降的过程,且最终1200 h后的试样弯曲强度为81.3 MPa,比老化前试样弯曲强度92.5 MPa下降了12%。前期的弯曲强度上升,从最初的弯曲强度92.5 MPa到200小时后的94.3 MPa,说明在老化过程中发生了后固化现象,即试样在制备时固化交联反应并未进行完全,在氙灯老化过程中引发剂、交联剂受到光热的联合作用,促使树脂进一步固化,分子主链增长;同时,分子链的凝聚缠结点增多,形成的网络交联密度增大。分子链运动受限,树脂弯曲强度增大,进而复合材料的弯曲强度增大。随着老化过程的进行,树脂的交联度接近最大,纯树脂的弯曲强度达到最大值。

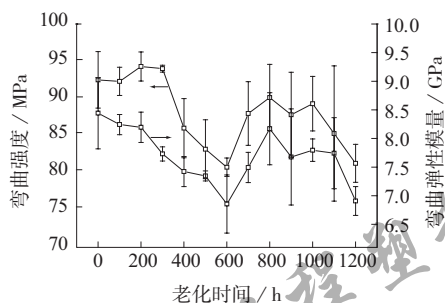


图4 不同氙灯老化时间下复合材料弯曲性能

由图4还可以看出,随着老化时间的延长,弯曲强度在老化600 h后下降到最低值80.8 MPa。主要原因是光、热和氧的老化降解以及时间性喷淋引起的树脂塑化和水解。氙灯加速老化过程中,氙灯辐射、潮湿及喷淋的机械作用,引起树脂的塑化和水解,致使试样表面树脂脱落,露出纤维,失重等。同时紫外线照射,使得聚酯从表面到内部发生了分子链的断裂和新的链生成,化学结构的改变产生了内应力,内应力达到一定程度便会出现裂纹。后期强度呈现短暂增大的趋势,800 h后的试样弯曲强度达到90.1 MPa,可能是由于分子主链增长,分子链上苯环增多,致使分子链刚性增大,材料变硬变脆。

图5为不同老化时间下的质量损失曲线。由于质量的损失率是由不同试样测得,因此质量损失率的波动受不同试样差异的影响。从图5可以看出,从老化开始直到老化500 h,试样质量有了明显的下降,500 h之后质量略有上升,之后又趋于平稳。应该是树脂体系中吸附了一定量的水分子,水分子促使树脂中的酯键水解,因水解造成了试样的质量损失。

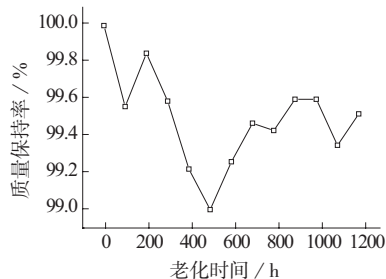


图5 不同氙灯老化时间下质量损失曲线

泛黄程度用 Y_I 表示, Y_I 值越大,说明颜色越黄。不饱和聚酯变黄的原因包括以下几种:高温引起的热老化黄变;接触紫外光引起的黄变;氧的存在引起的黄变。图6为不同氙灯老化时间下 Y_I 指数曲线。图7为氙灯老化后试样的颜色变化照片。图7中最下面是未老化之前的试样颜色,由下往上依次是老化500,900,1200 h的试样,通过照片可以看出老化500 h和900 h的试样变黄明显,而1200 h虽然老化时间较长,但黄变反而不明显。

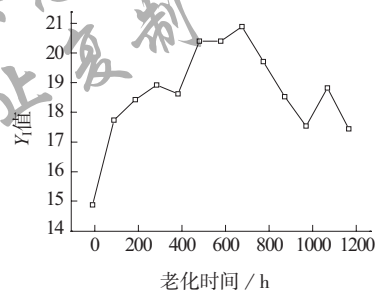


图6 不同氙灯老化时间下复合材料 Y_I 值曲线

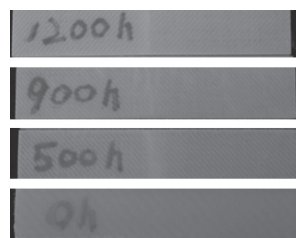
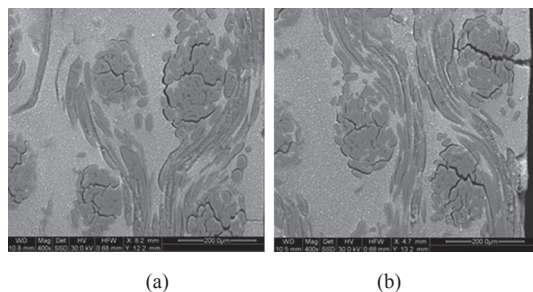


图7 不同氙灯老化后试样的颜色变化照片

图8为复合材料截面SEM照片。由图8照片可以看到,在光照一侧的复合材料表面出现了基体



a—未老化试样;b—氙灯老化1200 h后

图8 复合材料截面SEM照片(图右侧为光照面)

粉化、基体开裂、纤维开裂的现象,说明随着氙灯的持续照射,产生了基体的分子链断裂、苧麻纤维/树脂界面脱粘等变化,在材料的表面最先出现了应力集中,进而产生了裂纹,然后随着反应进一步深入,裂纹不断向材料内部延伸。这些表面的老化直接影响了复合材料的力学性能。本阶段复合材料的老化现象仅发生在材料表面,并没有继续深入到复合材料内部,因此力学性能下降并不多。图9为不同氙灯老化时间下复合材料的损耗角正切曲线。

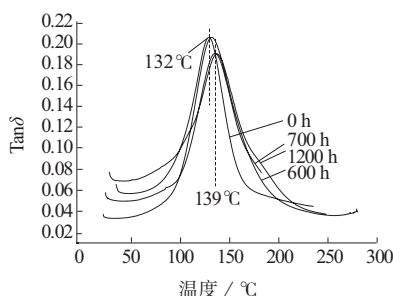


图9 不同氙灯老化时间下复合材料的损耗角正切曲线

由图9可见,老化600 h之前,复合材料的玻璃化温度都在132℃左右,700 h后玻璃化转变温度由132℃上升到139℃,与弯曲性能在600 h与700 h之间出现的力学性能上升的现象吻合,延长老化时间到1200 h后,玻璃化转变温度也一直维持在132℃到139℃之间。

图10为不同氙灯老化时间下复合材料的储能模量曲线。

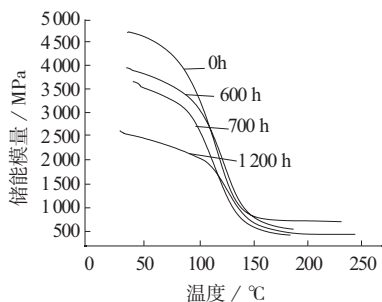


图10 不同氙灯老化时间下复合材料的储能模量曲线

由图10可见,未老化之前材料的储能模量在4700 MPa左右,老化600~700 h时,储能模量降低至4000 MPa以下,储能模量降低约15%,而老化1200 h之后,材料的储能模量降低至2500 MPa,下降47%。相比于弯曲性能下降12%,材料储能模量的下降更加明显,说明经历了1200 h的加速老化,材料脆性变大,这同样是聚酯基体老化的表现。图11是复合材料老化后的FTIR谱图。

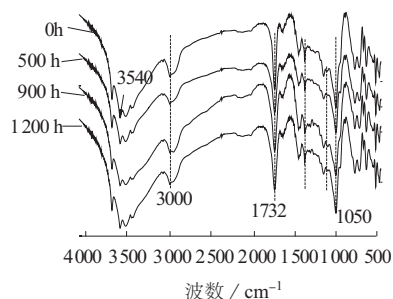


图11 不同氙灯老化时间下复合材料 FTIR 谱图

由图11可知,从上至下依次是老化0,500,900,1200 h。图11中1050 cm^{-1} 是纤维素中C—O键的伸缩振动谱带,包括主峰两侧一系列的肩带。1732 cm^{-1} 是聚酯类的C=O的伸缩振动谱带。3540 cm^{-1} 是O—H的吸收峰,在纤维素中O—H基含量较多。3000 cm^{-1} 是不饱和C—H键伸缩振动谱带,由红外光谱变化可以看到,虽然可能发生纤维素的降解,不饱和聚酯树脂的二次固化和分子链的断裂,但红外谱图并不能很清楚反映这些变化。

3 结论

制备了苧麻纤维增强复合材料,分别在紫外老化试验箱内放置600 h以及在氙灯老化试验箱内放置1200 h,测试了试样的弯曲性能退化率、质量损失率以及黄变指数,并初步研究了试样的老化机理。得到的结论如下:

(1) 紫外老化600 h内,会使苧麻纤维增强不饱和聚酯材料的弯曲强度快速下降。

(2) 氙灯老化1200 h内,苧麻纤维增强不饱和聚酯复合材料的弯曲强度先下降后上升,然后再下降,力学性能下降的同时,伴随着试样质量下降,表面变黄并从表面开始出现基体开裂的现象。

参考文献

- [1] 段成名,袁娇,费又庆. 热处理温度对苧麻纤维增强酚醛树脂复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用,2020,48(5):88-92.
Duan Chengming, Yuan Jiao, Fei Youqing. Effect of heat treatment temperature on properties of ramie fiber reinforced phenolic resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5): 88-92.
- [2] 孔莉莉,成玲,万培培,等. 苧麻纤维复合材料医用夹板的开发及智能化[J]. 材料导报,2018,32(7):1202-1208.
Kong Lili, Cheng Ling, Wan Peipei, et al. Development and intellectualization of ramie fiber composites medical splint[J]. Materials Review, 2018, 32(7): 1202-1208.
- [3] 段泽强,王晓丽,彭士涛. 聚多巴胺改性疏水苧麻纤维的性能研究[J]. 现代化工,2020,40(2):148-152.
Duan Zeqiang, Wang Xiaoli, Peng Shitao. Study on properties of polydopamine modified hydrophobic ramie fiber[J]. Modern

- Chemical Industry, 2020, 40(2):148–152.
- [4] 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性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(11):2579–2586.
- 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):2579–2586.
- [5] 陈旭, 刘燕峰, 刘青曼, 等. 织物处理工艺对苧麻纤维增强复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12):59–63.
- Chen Xu, Liu Yanfeng, Liu Qingman, et al. Influence of ramie fiber pre-treatment on mechanical properties of ramie fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):59–63.
- [6] Anna DILFI K.F., Che Zijin, Xian Guijun. 苧麻表面接枝改性及其对苧麻纤维增强环氧复合材料力学性能与界面性能的影响研究[J]. 浙江大学学报(英文版)(A辑:应用物理和工程), 2019, 20(9):660–674.
- Anna DILFI K.F., Che Zijin, Xian Guijun. Grafting of nano-silica onto ramie fiber for enhanced mechanical and interfacial properties of ramie/epoxy composite[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2019, 20(9):660–674.
- [7] 陈旭, 尹鹏, 咸贵军, 等. 苧麻纤维增强酚醛树脂基复合材料的湿热性能研究[J]. 航空材料学报, 2013, 33(2):58–65.
- Chen Xu, Yin Peng, Xian Guijun, et al. Hygrothermal properties of ramie fiber/phenolic resin composite under different hygrothermal conditions[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(2):58–65.
- [8] 尹鹏. 苧麻纤维增强树脂基复合材料的耐湿热老化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Yin Peng. Study on hygrothermal ageing of ramie fiber reinforced polymer composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 朱坤坤, 倪爱清, 王继辉. 苧麻/玻璃纤维混杂复合材料的老化研究及寿命预测[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(5):48–54.
- Zhu Kunkun, Ni Aiqing, Wang Jihui. Aging study and life prediction of ramie/glass fiber hybrid composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(5):48–54.
- [10] 殷秀水. 湿热环境下 CNF/EP/亚麻纤维复合材料耐久性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Yi Xiushui. Study on durability of CNF/EP/Flax fiber composites in hygrothermal environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [11] 陈旭, 张虎, 刘燕峰, 等. 苧麻纤维/玻璃纤维混杂增强不饱和聚酯复合材料的力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(11):47–52.
- Chen Xu, Zhang Hu, Liu Yanfeng, et al. Mechanical properties of ramie fiber and glass fiber reinforced unsaturated polyester composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(11):47–52.
- [12] 倪楠楠, 夏璐, 张文宇, 等. 苧麻纤维布和玻璃纤维布混杂铺层复合材料的力学性能[J]. 材料工程, 2019, 47(2):153–159.
- Ni Nannan, Xia Lu, Zhang Wenyu, et al. Mechanical properties of ramie fiber cloth and glass fiber cloth hybrid laminated composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2):153–159.
- [13] 倪楠楠, 温月芳, 王程成, 等. 苧麻纤维布和碳纤维布混杂铺层复合材料力学和阻尼性能研究[J]. 高分子学报, 2016(2):187–196.
- Ni Nannan, Wen Yuefang, Wang Chengcheng, et al. Studies on structural and damping properties of ramie fiber cloth and carbon fiber cloth hybrid laminate composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2016(2):187–196.
- [14] 吴昊, 花军, 刘诚, 等. 亚麻纤维增强环氧树脂基复合材料拉伸强度的预测模型[J]. 机械工程材料, 2015, 39(7):113–116.
- Wu Hao, Hua Jun, Liu Cheng, et al. Tensile strength prediction model of flax fiber reinforced epoxy resin matrix composite[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7):113–116.
- [15] 许家宝, 周储伟. 玻璃/亚麻纤维混杂复合材料的吸湿和动态粘弹性性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019, (5):38–43.
- Xu Jiabao, Zhou Chuwei. Study on moisture absorption and dynamic viscoelasticity of glass/flax fiber hybrid composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019, (5):38–43.
- [16] 薛冰, 张铁男. 亚麻纤维增强复合材料湿热环境中界面性能研究[J]. 纤维复合材料, 2018, 35(2):7–13.
- Xue Bing, Zhang Tienan. Research on interfacial properties of flax fiber reinforced composites in hygrothermal environment[J]. Fiber Composites, 2018, 35(2):7–13.
- [17] 小可, 薛昊, 程万里, 等. 黄麻纤维织物增强乙酯复合材料的制备与力学性能[J]. 林业工程学报, 2020, 5(1):88–96.
- DUVIOL T Tadondzo, Xue Hao, Cheng Wanli, et al. Preparation and mechanical properties of vinyl ester composites reinforced with jute woven fabric[J]. China Forestry Science and Technology, 2020, 5(1):88–96.
- [18] 杜思琦, 王继崇, 彭雄奇, 等. 可生物降解的黄麻纤维/聚乳酸复合材料的制备和力学性能[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(11):1335–1341.
- Du Siqi, Wang Jichong, Peng Xiongqi, et al. Fabrication and mechanical properties of biodegradable jute/poly(lactic acid) composites[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(11):1335–1341.
- [19] 宁军霞, 李佐深, 凌新龙. 黄麻纤维的性能及其改性技术研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(1):88–96.
- Ning Junxia, Li Zuoshen, Ling Xinlong. Performance and modification technology progress of jute fiber[J]. Journal of Textile Science & Engineering, 2020, 37(1):88–96.
- [20] 李瑞, 白天, Duviol Tadondzo Tatou, 等. 黄麻纤维增强聚酯复合材料的制备与力学性能[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(6):57–60.
- Li Rui, Bai Tian, Duviol Tadondzo Tatou, et al. Fabrication and performances of jute fiber reinforced polyester composites[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(6):57–60.