

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.02.009

薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的制备及力学性能

马扶宸^{1,2}, 杜涛^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 樊东焱^{1,2}, 钱大益^{1,2}, 武晋雄^{1,2}, 张会良³, 宋剑斌^{1,2}

(1.伊犁师范大学化学化工学院,新疆伊宁 835000; 2.新疆维吾尔自治区生物质资源清洁转化与高值利用重点实验室,新疆伊宁 835000;
3.中国科学院长春应用化学研究所中国科学院生态环境高分子材料重点实验室,长春 130022)

摘要: 为了实现薰衣草蒸馏废渣资源利用,将薰衣草蒸馏废渣与环氧树脂复合,通过模压工艺制备薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料,通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、万能力学试验机和扫描电子显微镜(SEM)等对复合材料的力学性能、形态结构和吸水率等进行分析。结果表明,随着薰衣草蒸馏废渣含量的增加,复合材料的力学性能呈先增大后减小的趋势;在薰衣草蒸馏废渣质量分数为 60% 时复合材料具有最优的冲击强度(1.56 kJ/m²)和弯曲强度(40.1 MPa);在此含量基础上,采用氢氧化钠处理薰衣草蒸馏废渣,结果表明,所获得的环氧树脂复合材料的冲击强度和弯曲强度分别达到了 3.04 kJ/m² 和 66.2 MPa,较未处理时增加了 94.9% 和 65%。FTIR 分析结果表明,碱处理可以消除薰衣草蒸馏废渣表面的脂类等物质,改善了其与环氧树脂的界面性能;SEM 结果证实,经碱处理后的复合材料内部有大量丝状物产生;吸水率结果表明,复合材料的吸水率随薰衣草蒸馏废渣含量的增加而增大,且经过碱处理后,复合材料具有较高的吸水率。

关键词: 薰衣草;环氧树脂;力学性能;碱处理

中图分类号: TQ050.4+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)02-0051-06

Preparation and mechanical properties of lavender distillation residue/epoxy resin composites

MA Fuchen^{1,2}, DU Tao^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, FAN Dongyan^{1,2}, QIAN Dayi^{1,2}, WU Jinxiong^{1,2}, ZHANG Huiliang³, SONG Jianbin^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China;

2. Key Laboratory of Clean Conversion and High Value Utilization of Biomass Resources in Xinjiang, Yining 835000, China;

3. Key Laboratory of Polymer Ecomaterials, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract : In order to achieve the utilization of lavender distillation residue resources, lavender distillation residue and epoxy resin as raw materials were used to prepare lavender distillation residue/epoxy resin composites using a method of molding technology, and the mechanical properties, morphology, structure, and water absorption of the composites were studied in detail through Fourier transform infrared spectrum (FTIR), universal mechanical testing machine and scanning electron microscope (SEM) and so on. The results show that as the content of lavender distillation residue increases, the mechanical properties of the composites show a trend of first increasing and then decreasing. At 60 wt% of lavender distillation residue, the composite has the best impact strength (1.56 kJ/m²) and flexural strength (40.1 MPa). On this basis, sodium hydroxide was used to treat lavender distillation residue. The results show that the impact strength (3.04 kJ/m²) and flexural strength (66.2 MPa) of the obtained epoxy resin composite are further increased by 94.9% and 65%, respectively. The FTIR analysis results indicate that alkali treatment can eliminate the lipid substances on the surface of lavender distillation residue and improve the interface performance with epoxy resin. SEM results confirm that a large amount of filamentous substances are generated inside the composite treated alkali treatment. The water absorption test indicates that the water absorption of the composite increases with the increase of lavender distillation residue content, and after alkali treatment, the composite has a higher water absorption.

Keywords : lavender ; epoxy resin ; mechanical property ; alkali treatment

基金项目: 新疆维吾尔自治区教育厅天然产物化学与应用化学重点实验室开放课题资助项目(2021YSHXZD03)

通信作者: 宋剑斌,教授/博士,主要从事高分子改性、复合材料研究等

收稿日期: 2023-12-14

引用格式: 马扶宸,杜涛,刘伟,等.薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J].工程塑料应用,2024,52(2):51-56.

MA Fuchen, DU Tao, LIU Wei, et al. Preparation and mechanical properties of lavender distillation residue/epoxy resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(2): 51-56.

随着人们环保意识的提升,可持续的、可生物降解的、更环保的天然纤维复合材料成为研究重点^[1-3]。天然植物纤维分布广泛、无毒无害、对环境友好且价格低廉,天然纤维复合材料表现出优异的力学性能、较轻的质量、较低的加工和生产成本,显示出其有望替代传统纤维增强材料的潜力^[4-5]。

天然植物纤维表面含有大量极性基团,与高分子树脂复合时易造成界面相容性差的情况,因此改善天然植物纤维与树脂基体间的界面性能是提高整个复合材料性能的关键。相关研究表明,碱处理工艺是天然植物纤维化学改性的主要方法。碱处理可促进天然植物纤维表面粗糙化,增大其表面积,有利于高分子渗透,同时还可去除果胶、蜡层等物质,有助于复合材料性能的改善^[6-7]。Prabhudass等^[8]利用5%的氢氧化钠(NaOH)溶液对椰棕、红麻纤维进行表面处理,结果表明,处理后的复合材料力学性能较处理前有明显提高。陈季荷等^[9]通过采用电子显微镜和红外分析的方法对碱处理后的竹纤维增强环氧树脂复合材料进行观测,结果表明,纤维表面含羟基杂质被去除,氢键数量增加,附着力增强,证明树脂和纤维之间界面性能得到改善。

我国新疆是薰衣草世界主要产地之一,播种面积已经达到4 335万m²以上。每年由于提炼薰衣草精油而产生大量的废渣。如果按照每公顷产生67.5 kg废渣计算的话,那么每年可产生废渣14万t以上。除了一部分作为肥料和燃料外,大部分薰衣草蒸馏废渣未经进一步处理而直接被丢弃,造成资源浪费和环境污染。研究表明废渣中的纤维具有较高的比强度和比模量^[10],在纤维增强材料中具有较高的应用前景。

因此笔者采用新疆伊犁产的薰衣草蒸馏废渣与环氧树脂制备复合材料,先通过力学性能测试探究薰衣草蒸馏废渣与环氧树脂的最佳比例和碱处理对复合材料力学性能的影响,再运用扫描电子显微镜(SEM)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析研究薰衣草蒸馏废渣表面基团以及材料形态变化。通过该研究期望能为薰衣草蒸馏废渣的高值化发展提供一定的理论指导和应用基础。

1 实验部分

1.1 主要原料

双酚A环氧树脂(BE186)A胶、B胶(固化剂低分子量聚酰胺):工业级,东莞华工复合材料有限公司;

薰衣草蒸馏废渣:新疆伊犁天山花海农业有限公司。

1.2 主要仪器及设备

小型平板硫化机:CREE-6014B-30T,东莞市科锐仪器科技有限公司;

FTIR仪:Cary 630,美国Agilent有限公司;

万能力学试验机:UTM-1432s,承德市金建检测仪器有限公司;

电子简支梁冲击试验机:XJJD-5,承德市金建检测仪器有限公司;

SEM:Merlin,德国蔡司有限公司。

1.3 试样制备

首先将薰衣草蒸馏废渣粉碎,过100目~120目筛子后用清水洗净,置于80℃干燥箱中烘干12h;然后将薰衣草蒸馏废渣放入盛有环氧树脂A胶、B胶的容器中混合均匀,其中环氧树脂A胶与B胶的质量比为3:1;为大规模利用薰衣草蒸馏废渣,将薰衣草蒸馏废渣在整个材料中的质量分数定为50%,60%,70%,同时高含量填充有利于形成更加均匀的复合材料。将薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂混合物置于模具中,转移至小型平板硫化机中,在80℃,7MPa压力下固化60min,然后升高温度至100℃,固化2h,取出后冷却至室温,最后用切割机切成测试样条备用。

为进一步提高复合材料性能,采用NaOH处理薰衣草蒸馏废渣。首先将洗净且干燥好的薰衣草蒸馏废渣置于5%的NaOH溶液中,常温下浸泡12h并每隔2h充分搅拌1次。浸泡结束后取出薰衣草蒸馏废渣,用去离子水冲洗多次,直至pH中性,然后将其置于80℃烘箱中干燥12h,得碱处理后的薰衣草蒸馏废渣。最后采用同样方法制备薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料试样。

1.4 性能测试与结构表征

FTIR测试:采用FTIR仪测量碱处理前后的薰衣草蒸馏废渣,波数范围为600~4 000cm⁻¹。

SEM表征:将冲击测试后的试样,保留断裂面,采用SEM观察试样断裂面形貌。

力学性能测试:复合材料的冲击强度和弯曲强度按照GB/T 1843-2008和GB/T 9341-2008测试;弯曲强度测试速度为10mm/min,室温测量;每组测试5个,取其平均值。

吸水率测试:首先将待测试样放入80℃烘箱中

干燥 24 h,取出冷却后称重(m_1)。然后将样品浸入盛满去离子水的烧杯中,浸泡时间为 24 h。试样取出后用干净纸巾擦去表面水分,称重(m_2)。复合材料吸水率(X)根据公式(1)计算。

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

冲击强度是天然纤维增强复合材料重要性能参数之一。图 1 为薰衣草蒸馏废渣填充环氧树脂的冲击强度。纯环氧树脂冲击强度是 1.86 kJ/m^2 ,由图 1 看出,添加薰衣草蒸馏废渣后,复合材料的冲击强度开始下降,这是由于刚性纤维的加入所导致,同时纤维与树脂界面性能下降也是另一原因。由图 1 中发现在薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料中,随着薰衣草蒸馏废渣含量的增加,薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的冲击强度先增加后减小。当薰衣草蒸馏废渣质量分数达到 60% 时,复合材料出现最大的冲击强度,为 1.56 kJ/m^2 ,这是因为薰衣草含量不高时,薰衣草蒸馏废渣能均匀地分散在环氧树脂基体中,良好分散能最大限度吸收外界能量,从而使产生的应力能充分得到释放,韧性得到改善。但是当薰衣草蒸馏废渣含量过高时,薰衣草蒸馏废渣发生团聚,使得环氧树脂无法完全润湿废渣,导致整个复合材料的冲击强度开始下降。因此从材料的冲击强度结果来看,当薰衣草蒸馏废渣质量分数达到 60% 时,复合材料的韧性最好。

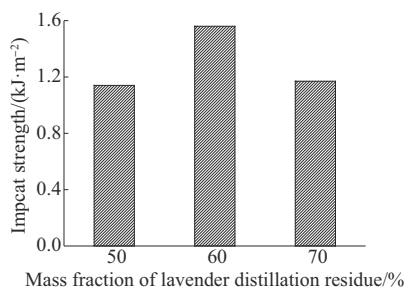


图 1 薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的冲击强度

Fig. 1 Impact strength of lavender distillation residue/epoxy resin composites

图 2 是薰衣草蒸馏废渣经碱处理前后所制备的复合材料的冲击强度。薰衣草蒸馏废渣质量分数控制在 60%。由图 2 发现,薰衣草蒸馏废渣经过 NaOH 处理后,整个复合材料的冲击强度从 1.56 kJ/m^2 提高到 3.04 kJ/m^2 ,增加了 94.9%。这个数值也远高于纯环氧树脂(1.86 kJ/m^2)。碱处理后薰衣草蒸馏

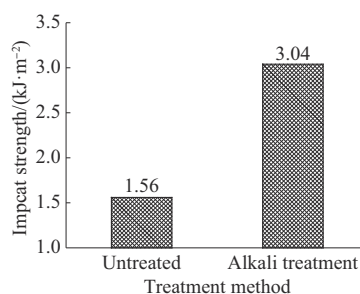


图 2 薰衣草蒸馏废渣经碱处理前后复合材料的冲击强度

Fig. 2 Impact strength of composites before and after alkaline treatment of lavender distillation residue

废渣/环氧树脂复合材料韧性的改善是由于薰衣草蒸馏废渣中的木质素、半纤维素、果胶、蜡层等被去除后,裸露的纤维素表面大量的羟基与环氧树脂中的羟基形成强烈相互作用导致的;同时薰衣草蒸馏废渣经表面处理,其表面粗糙度提高,这也会增加和环氧树脂的接触面积,产生更稳固的机械接合作用^[11-12],因此薰衣草蒸馏废渣与环氧树脂的界面性能得到极大改善,材料的冲击强度得到增强。

弯曲强度是用来表征材料抵抗弯曲而不发生断裂的能力,刚性填料和天然纤维的加入往往会提高材料的弯曲强度。图 3 是薰衣草蒸馏废渣含量对复合材料弯曲强度的影响。纯环氧树脂弯曲强度为 35.6 MPa ,由图 3 看出,加入薰衣草蒸馏废渣后,整个复合材料的弯曲强度都有所上升。与冲击强度变化类似,复合材料的弯曲强度随薰衣草蒸馏废渣含量的增加,同样呈现先增大后减小的趋势,当薰衣草蒸馏废渣质量分数为 60% 时达到最大值,此时弯曲强度为 40.1 MPa ,与薰衣草蒸馏废渣质量分数为 50% 的材料相比,提高了 6%。当薰衣草蒸馏废渣质量分数达到 70% 时,复合材料的弯曲强度开始下降。图 4 为薰衣草蒸馏废渣质量分数控制在 60% 时,其经碱处理前后的复合材料弯曲强度比较。由图 4 可知,经碱处理后的复合材料的弯曲强

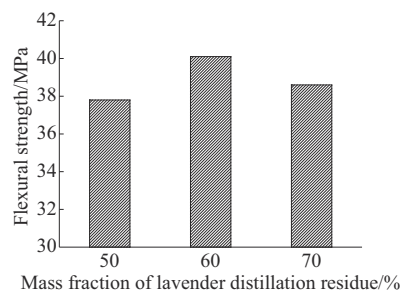


图 3 薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的弯曲强度

Fig. 3 Flexural strength of lavender distillation residue/epoxy resin composite

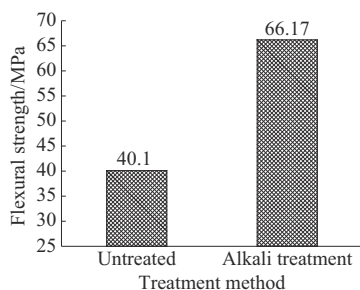


图4 薰衣草蒸馏废渣经碱处理前后复合材料的弯曲强度

Fig. 4 Flexural strength of composites before and after alkaline treatment of lavender distillation residue

度为66.2 MPa,与未处理的相比较(40.1 MPa),提高了65%,通过碱处理,去除纤维表面暴露的果胶、蜡层等杂质,使得复合材料粗糙度增加,附着力变强,进而提高了材料的弯曲性能。

2.2 FTIR 分析

为进一步验证薰衣草蒸馏废渣经碱处理后对复合材料力学性能影响的原因,采用FTIR对薰衣草蒸馏废渣表面结构进行分析。图5是薰衣草蒸馏废渣经碱处理前后的FTIR谱图。由图5看出,3 300 cm^{-1} 附近出现的吸收峰是纤维表面羟基的伸缩振动吸收峰,碱处理前后该吸收峰位置及宽度并未发生明显变化,表明碱处理对羟基影响不大。2 934 cm^{-1} 和2 848 cm^{-1} 出现两个红外吸收峰来源于 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 对称和非对称的伸缩振动吸收峰。未处理的薰衣草蒸馏废渣在1 734 cm^{-1} 处出现的吸收峰是 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰,这是薰衣草蒸馏废渣含有的低分子脂类结构 $-\text{COOR}$ 所产生的。这个吸收峰在经过碱处理后消失,这是由于该酯类结构在碱性条件下发生水解,从而被去除。1 250 cm^{-1} 处出现的吸收峰是 $-\text{COOR}$ 中的 $-\text{C}-\text{O}-$ 所引起的,这个吸收峰经过碱处理后也消失了^[13]。FTIR分析结果表明薰衣草蒸馏废渣经过碱处理后,其中的低分子脂类物质得到有效去除,进而改善了薰衣草蒸馏废渣

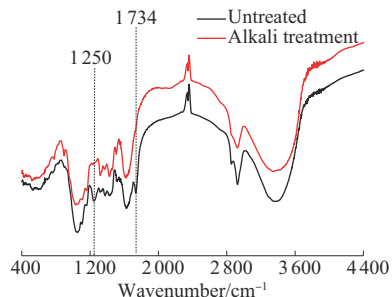


图5 薰衣草蒸馏废渣经碱处理前后的FTIR谱图

Fig. 5 FTIR spectrum of lavender distillation residue before and after alkaline treatment

与环氧树脂的界面性能。

2.3 SEM 形貌分析

图6为碱处理及未处理的薰衣草蒸馏废渣制备的复合材料的断裂面SEM照片。从图6可以发现薰衣草蒸馏废渣纤维整齐地排列在环氧树脂基体中,但由图6A可以发现,在薰衣草蒸馏废渣纤维表面存在大量的丝状物,而在图6B中却很少有这种丝状物,且断裂面较光滑平整,很少有形变出现。这种丝状物主要是在断裂过程中高分子树脂发生变形所致,是树脂与纤维具有良好界面性能的标志。对比两图,可以得出结论,通过碱处理后,薰衣草蒸馏废渣与环氧树脂之间的界面性能得到极大改善,这也是导致碱处理后的薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料具有更佳冲击强度和弯曲性能的原因。

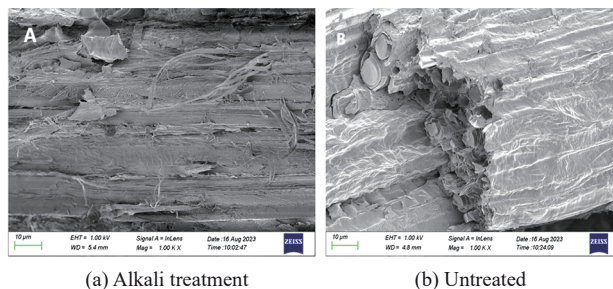


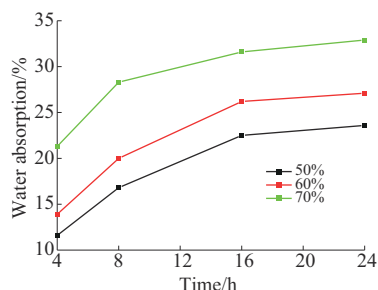
图6 薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料断裂面SEM照片

Fig. 6 SEM photograph of fracture surface of lavender distillation residue/epoxy composite before and after alkaline treatment

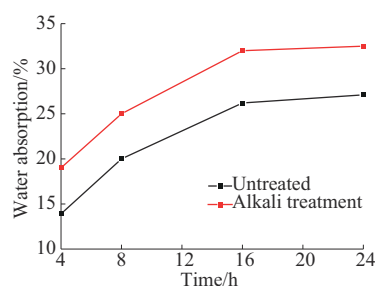
2.4 吸水率分析

复合材料的吸水性能是天然纤维增强复合材料的一个重要研究指标,复合材料具有较低的吸水率才能保证其拥有稳定的力学性能,使其拥有较长的使用年限^[14-15],图7a为不同薰衣草蒸馏废渣含量下薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的吸水率。从图7a可以得出,复合材料的吸水率随浸泡时间的延长及薰衣草蒸馏废渣含量的增加而增大。这是由于当薰衣草蒸馏废渣含量越来越大时,由于环氧树脂不能很好地浸润薰衣草蒸馏废渣,导致树脂与薰衣草蒸馏废渣之间存在孔隙,在浸泡过程中必然存在吸水现象;另一方面随着薰衣草蒸馏废渣含量的增加,单位体积内纤维表面的极性团(羟基)含量也在增加,必然导致材料的吸水率大大增加。图7b为未经碱处理与碱处理后的薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的吸水率。由图7b可知在相同时间内,经碱处理后的薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料比未处理的复合材料具有更高的吸水率,其原因可能是经碱处理后的薰衣草蒸馏废渣表面产生裂

痕凹陷,形成毛细管效应,水沿毛细管壁向上升,导致吸水率上升,同时碱处理使一些脂类小分子物质被去除,导致更多的羟基裸露出来,从而使复合材料吸水率增加^[16]。



(a) Composites with different mass fraction of lavender distillation residue



(b) Composites with 60% lavender distillation residue

图7 薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的吸水率曲线

Fig. 7 Water absorption curves of lavender distillation residue/epoxy resin composites

3 结论

通过模压方法制备了薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料,对复合材料的力学性能、形貌结构和吸水率做了详细研究,获得结果如下。

(1)薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的弯曲强度和冲击强度随着薰衣草蒸馏废渣含量的增加先增大,并在薰衣草蒸馏废渣质量分数为60%时达到最大值,进一步增加薰衣草蒸馏废渣含量,复合材料力学性能开始下降。

(2)薰衣草蒸馏废渣经过NaOH溶液处理后,以其质量分数60%为例,所制备的薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的弯曲强度和冲击强度都获得了极大的提升。与未经过NaOH处理的材料相比,碱处理后材料的冲击强度和弯曲强度分别提高了94.9%和65%。

(3) FTIR证实了薰衣草蒸馏废渣经NaOH处理后,可有效去除脂类等小分子物质,改善了环氧树脂与薰衣草蒸馏废渣的界面性能;SEM结果也表明,经碱处理后的复合材料在断裂后形成了大量的丝状物,材料的韧性得到改善。

(4)吸水率测试结果表明,复合材料的吸水率随薰衣草蒸馏废渣含量的增加而增大,且经过碱处理后的复合材料的吸水率要高于未处理的材料。

参考文献

- [1] IHUEZE C C, OKAFOR C E, OBUKA S N, et al. Integrity and cost evaluation of natural fibers/HDPE composite tailored for piping applications[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, 36(1):372–398.
- [2] PAWŁOWSKA A, STEP CZYŃSKA M, WALCZAK M. Flax fibres modified with a natural plant agent used as a reinforcement for the polylactide-based biocomposites[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 184(15). DOI:10.1016/j.indcrop.2022.115061.
- [3] ARAVINTH K, KONDUSAMY V, RAMAKRISHNAN T, et al. Investigation of mechanical properties on agave plant fiber composite by experimental and numerical methods[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI:10.1016/j.matpr.2023.07.054.
- [4] PALANIKUMAR K, THIAGARAJAN R, LATHA B. Bio-fiber reinforced composite materials[M]. Amsterdam:Elsevier, 2015.
- [5] ALOMAYRI T, ALI B. Effect of plant fiber type and content on the strength and durability performance of high-strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132166.
- [6] MISHRA S, MOHANTY A K, DRZAL L T, et al. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites[J]. *Composites science and technology*, 2003, 63(10):1 377–1 385.
- [7] 李新功,郑霞,吴义强. 界面调控对竹纤维/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. *功能材料*, 2013, 44(2):253–257.
LI Xingong, ZHENG Xia, WU Yiqiang. Effect of interface control on properties of bamboo fibers/polylactic acid composites[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(2):253–257.
- [8] PRABHUDASS J M, PALANIKUMAR K. Experimental investigation of mechanical and thermal properties of coir-kenaf reinforced epoxy composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 3 834–3 837.
- [9] 陈季荷,顾少华,李文婷,等. NaOH碱处理浓度对毛竹篾及其环氧树脂复合材料性能影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 234–240.
CHEN Jihe, GU Shaohua, LI Wenting, et al. Effects of NaOH alkali treatment concentration on the properties of moso bamboo strips and their epoxy resin composites[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2022, 38(15):234–240.
- [10] 努兰·拜都拉,玛依拉·吐尔地别克,恩特马克·布拉提白. 伊犁薰衣草幼苗根际真菌的分离筛选及抑菌活性探究[J]. *现代农业研究*, 2023, 29(8):128–131.
BAIDULA N, MAYILA T, ENTOMACKY B. Isolation and screening of rhizosphere fungi from Ili lavender seedlings and

- study on their antibacterial activity[J]. *Modern Agriculture Research*, 2023, 29(8):128–131.
- [11] CHEN H, ZHANG W, WANG X, et al. Effect of alkali treatment on wettability and thermal stability of individual bamboo fibers[J]. *Journal of Wood Science*, 2018, 64:398–405.
- [12] FORTEA-VERDEJO M, BUMBARIS E, BURGSTALLER C, et al. Plant fibre-reinforced polymers: where do we stand in terms of tensile properties[J]. *International Materials Reviews*, 2017, 62(8): 441–464.
- [13] 甯阳. 聚乳酸/竹纤维复合材料的增容改性及其增容机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- NING Yang. Compatibilization modification of polylactic acid/bamboo fiber composites and the study of its compatibilization mechanism[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [14] BAHAMMOU Y, KOUHILA M, TAGNAMAS Z, et al. Hygroscopic behavior of water absorbed by capillarity and stabilization of a bio-composite building material: Clay reinforced with *Chamarrops humilis* fibers[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 135:106 077–106 087.
- [15] 玉澜, 陈燕萌, 胡华宇, 等. 改性竹粉/PVC复合材料吸水和力学性能研究[J]. *现代塑料加工应用*, 2021, 33(6):1–4.
- YU Lan, CHEN Yanmeng, HU Huayu, et al. Study on water absorption properties and mechanical properties of modified bamboo powder/PVC composites[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2021, 33(6):1–4.
- [16] CHAI H, WANG X, REHMAN W U, et al. Study on water absorption and mechanical properties of CNF-Ti reinforced epoxy resin composites[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2023, 52(1): 47–58.
-
- (上接第50页)
- [10] SU Shen. Compatibilization, processing and characterization of poly (butylene adipate terephthalate)/polylactide (PBAT/PLA) blends[J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(2). DOI: 10.1088/2053-1591/ac55c7.
- [11] DING Yue, FENG Wutong, LU Bo, et al. PLA-PEG-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the interfacial structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends[J]. *Polymer*, 2018, 146:179–187.
- [12] KIM H, JEON H, LEE M, et al. Enhanced mechanical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/cellulose nanocrystal nanocomposites obtained by in situ polymerization[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(1):635–643.
- [13] ZOU Baosheng, YANG Zhiqian, LIU Wanhui, et al. Novel Sb-doped cobalt oxide as a catalyst on peroxymonosulfate activation to degrade organic pollutants efficiently[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 3(11). DOI: 10.1016/j.jece.2023.110087.
- [14] NG S, STURALA J, VYSKOCIL J, et al. Two-dimensional functionalized germananes as photoelectrocatalysts[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7):11 681–11 693.
- [15] 庄颖, 杜玮辰, 王文, 等. 钛系聚酯催化剂的研究进展[J]. *化学反应工程与工艺*, 2021, 37(5):467–473.
- ZHUANG Ying, DU Weichen, WANG Wen, et al. Progress of study on titanium catalyst for polyester synthesis[J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2021, 37(5):467–473.
- [16] UKARDE T, PAWAR H. A Cu doped TiO₂ catalyst mediated catalytic thermo liquefaction (CTL) of polyolefinic plastic waste into hydrocarbon oil[J]. *Fuel*, 2021, 285. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119155.
- [17] CHEN Liwei, XU Jumei, XUE Weilan. et al. Mechanism and kinetics of esterification of adipic acid and ethylene glycol by tetrabutyl titanate catalyst[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2018, 35:82–88.