不同改性剂对PP/竹纤维复合材料力学性能的影响

漆明毅,王 芳,和金兰,郭丽娜

(云南工商学院建筑与设计学院,云南 昆明 650000)

摘 要:为提高竹纤维(BF)与聚丙烯(PP)的相容性,探究改性剂种类对PP/BF复合材料力学性能的影响。研究表明:BF经NaOH处理后,表面粗糙度增加。再用硅烷偶联剂(KH550)和钛酸酯偶联剂(TECA)对其进行改性,得到K-BF和T-BF,两种改性BF的表面粗糙度进一步增加,BF与PP相容性提高。采用改性BF制备的复合材料拉伸强度、硬度和耐磨性能明显提高。当改性BF添加量为30 phr时,复合材料的拉伸强度、硬度和耐磨性能最佳。与PP相比,添加K-BF和T-BF的复合材料拉伸强度分别提高26.0%和23.9%,洛氏硬度分别提高14.1%和10.1%,磨损率分别降低76.5%和62.7%,而断裂伸长率分别降低10.4%和6.7%。因此,改性剂种类影响复合材料力学性能的增强效果,KH550对复合材料的刚性性能增强效果好,而TECA对复合材料的柔性性能增强效果好。

关键词:竹纤维;聚丙烯;改性剂;力学性能

中图分类号:TQ325.14;TB332 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0034-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.007

Effect of Different Modifiers on Mechanical Properties of PP/Bamboo Fiber Composites

QI Mingyi, WANG Fang, HE Jinlan, GUO Li'na

(College of Architecture and Design, Yunnan Institute of Technology and Business, Kunming 650000, China)

Abstract: To improve the compatibility between bamboo fiber (BF) and polypropylene (PP), the influence of modifier types on the mechanical properties of PP/BF composites was investigated. The results showed that after NaOH treatment, the surface roughness of BF was increased. Subsequently, the treated BF was modified with a silane coupling agent (KH550) and a titanate coupling agent (TECA), resulting in K-BF and T-BF, respectively. Both modified BF samples exhibited further increased surface roughness and improved compatibility with PP. The tensile strength, hardness, and wear resistance of the composites prepared with modified BF were significantly enhanced. When the modified BF content reached 30 phr, the composites achieved optimal tensile strength, hardness, and wear resistance. Compared with PP, the tensile strength increased by 26.0% and 23.9%, the Rockwell hardness increased by 14.1% and 10.1%, the wear rate decreased by 76.5% and 62.7%, while the elongation at break decreased by 10.4% and 6.7%, respectively. Therefore, the type of modifier influenced the enhancement of the mechanical properties of the composites. KH550 demonstrated a better effect on improving the rigidity, whereas TECA exhibited a superior effect on enhancing the flexibility of the composites.

Keywords: BF; PP; Modifier; Mechanical properties

聚丙烯(PP)因具有优异的耐腐蚀性和耐水性,被广泛应用于交通、建筑、水利工程及日用品等领域[1-3]。但其具有热收缩率较大、易老化以及耐磨性不足等缺点,在一定程度上限制其应用[4-5]。天然竹纤维(BF)具有长径比大、比强度高、可生物降解以及耐老化等特征,加之竹材生长快,产量高且资源丰富,近年来BF增强聚合物研究受到广泛关注[6-8]。BF可替代传统增强纤维提升聚合物综合性能,其复合材料在园林、土木工程、装饰制品、汽车部件及包装材料等领域具有广阔应用前景[9-11]。左迎峰等[12]对聚乳酸(PLA)/BF复合材料力学性能进行研究,发现氢氧化钠(NaOH)溶液处理可增加BF表面粗糙度,从而提高BF与PLA的界面黏结力。在60 ℃下,以3% NaOH溶液处理4 h,复合材料力学性能和耐水性能最优。茹燕平等[13]对PP/BF复合板材进行研究发现,当PP和BF质量比为1∶1、模压温度为180 ℃、模压时间为30 min时,复合板材的综合力学性能最佳。因此,向PP基体中引入BF,既可弥补

收稿日期Submitted date 2025-08-14;修回日期Revised date 2025-09-18;录用日期Accepted date 2025-10-23

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2025J1356)

联系人,QiMingyi123456@163.com

引用本文:漆明毅,王芳,和金兰,等.不同改性剂对PP/竹纤维复合材料力学性能的影响[J].塑料科技,2026,54(9):34-38.

Citation:QI M Y, WANG F, HE J L, et al. Effect of different modifiers on mechanical properties of PP/bamboo fiber composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 34-38.

PP的性能缺陷，减少PP用量，降低复合材料成本，又能提高BF的利用率，具有显著的环保意义[11,14]。然而，植物纤维表面极性较高，与非极性PP基体的界面相容性差，从而影响复合材料的整体性，对其力学性能产生不利影响[15-17]。

为提高BF与聚合物的相容性，通常采用碱处理或改性剂对纤维表面进行处理，但目前不同改性剂对植物纤维增强PP复合材料的影响研究较少[18-19]。本研究系统探究改性剂种类对PP/BF复合材料力学性能的影响，以期为BF在聚合物中的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

BF，200目，河北率坤科技有限公司；PP，熔体流动速率(MFR)为2.5 g/10 min，中国石油天然气股份有限公司；NaOH，分析纯，无锡市晶科化工有限公司；硅烷偶联剂(KH550)，工业级，质量分数99%，山东霖祥化工有限公司；钛酸酯偶联剂(TECA)，NDZ-201，工业级，质量分数99%，南京优普化工有限公司；硬脂酸锌，质量分数98%，廊坊乾耀科技有限公司；抗氧剂，BHT，质量分数99%，滨州双沣化工有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Nicolet iS50，美国Thermo Fisher公司；扫描电子显微镜(SEM)，Q-20，美国TA仪器公司；智能电子拉力试验机，TST-01B，济南众测机电设备有限公司；洛氏硬度计，HR-150，苏州谦通仪器设备有限公司；摩擦试验机，QG-700，兰州中科凯华科技开发有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 碱溶液处理BF

先将BF在105 ℃的烘箱中干燥8 h，然后放入质量分数为10%的NaOH溶液中超声分散30 min (BF与NaOH溶液的质量比为1∶10)。过滤出BF，用去离子水反复冲洗，直至冲洗液pH值为7。将经过碱溶液处理后的BF在80 ℃烘箱中干燥12 h，得到N-BF，备用。

1.3.2 改性剂处理BF

将无水乙醇分别与KH570和TECA混合(质量比均为1∶5)配制改性剂溶液。将一定量的N-BF分别放入KH570和TECA改性溶液中超声分散2 h，其中N-BF与KH570或TECA改性溶液的质量比均为1∶9。将处理后的N-BF进行过滤，放入80 ℃烘箱中干燥12 h，得到的改性BF分别记为K-BF和T-BF。

1.3.3 复合材料的制备

表1为复合材料的配方。将不同BF、PP及其他助剂按表1配方加入高速混料机中混合10 min。然后将混合料加入密炼机中密炼10 min，温度设置175 ℃。再将物料粉碎并冷却至室温后，在200 ℃的注塑机中注塑成型。最后制成测试所需尺寸。

表1 PP/BF复合材料的配方

Tab.1 Formula of PP/BF composites 单位：phr

样品名称	添加量				
	PP	硬脂酸锌	抗氧剂	K-BF	T-BF
PP	100	1.5	0.5	0	0
PP/K-BF(15)	100	1.5	0.5	15	0
PP/K-BF(30)	100	1.5	0.5	30	0
PP/K-BF(45)	100	1.5	0.5	45	0
PP/T-BF(15)	100	1.5	0.5	0	15
PP/T-BF(30)	100	1.5	0.5	0	30
PP/T-BF(45)	100	1.5	0.5	0	45

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：将待测试样与KBr在105 ℃烘箱中干燥24 h后压片测试红外光谱，扫描次数32次，波数范围4 000~400 cm^{-1}，分辨率4 cm^{-1}。

微观分析：用扫描电子显微镜观察BF和复合材料断面的微观形貌。

力学性能测试：参考GB/T 1040.2—2022测试拉伸强度和断裂伸长率，拉伸速率20 mm/min，试样平行段尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。参考GB/T 3398.2—2008测试洛氏硬度，初负荷98.07 N下压10 s，主负荷588.4 N下压15 s，试样尺寸30 mm×30 mm×6 mm。在200 N荷载下摩擦30 min测试磨损率，试样尺寸30 mm×6 mm×7 mm。

2 结果与讨论

2.1 改性BF的表征

图1为不同处理方式下BF的FTIR谱图。从图1可以看出，未处理的BF主要出现的特征吸收峰包括：3 385 cm^{-1}附近对应BF木质素和纤维素的羟基(—OH)的拉伸振动；2 876 cm^{-1}处对应甲基(—CH_3)和亚甲基(—CH_2—)中的C—H振动吸收峰；1 740 cm^{-1}处对应半纤维素和果胶中乙酰基(—$COOCH_3$)的羰基(C═O)伸缩振动吸收峰；1 240 cm^{-1}处对应木质素中伯醇或仲醇的(C—O)伸缩振动；995 cm^{-1}处对应纤维素的—OH的拉伸振动[17-18]。在N-BF谱图中可以看到，3 385 cm^{-1}和995 cm^{-1}处的—OH吸收峰变强；1 740 cm^{-1}处C═O吸收峰基本消失；1 240 cm^{-1}处C—O吸收峰减弱，而其他特征峰基本未变。这说明NaOH对BF的主要结构没有影响，只是除去了果胶，减少了木质素物质，增加了BF表面的—OH含量[19-20]。经过NaOH处理，再用KH550或TECA改性后，BF的主要特征官能团吸收峰均存在，说明改性剂未改变BF的结构。与N-BF相比，K-BF和T-BF在3 385 cm^{-1}和995 cm^{-1}附近的—OH吸收峰变弱；2 876 cm^{-1}附近的C—H伸缩振动变强。K-BF在1 140 cm^{-1}和752 cm^{-1}处出现了新吸收峰，分别对应Si—O—C基团和KH550的特征基团Si—O—Si。T-BF在1 015 cm^{-1}处出现了新吸收峰，对应TECA的特征官能团O—Ti[21]。这是因为KH550或TECA均含有C—H，因此C—H有所增强；而KH550中的硅羟基(—SiOH)可以与BF

表面—OH发生缩合反应生成Si—O—C，TECA可以与BF表面—OH发生酯化反应，这均会消耗BF表面—OH，因此—OH减弱。KH550接枝到BF表面后，引入了KH550特征基团Si—O—Si，并反应生成了Si—O—C基团；TECA接枝到BF表面后，引入了TECA特征官能团O—Ti。这说明NaOH可以除去BF表面果胶和减少木质素物质，并且增加了BF表面的—OH。而KH550和TECA能够与BF表面的—OH通过化学结合接枝到BF表面，并且NaOH和改性剂处理均未改变BF的主体骨架结构。

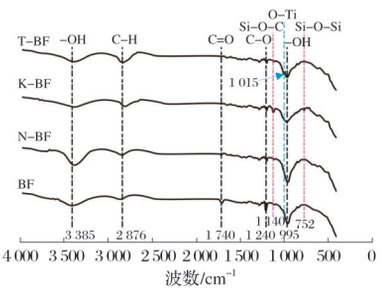


图1 不同处理方式下BF的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of BF under different processing methods

图2为不同处理方式下BF的SEM照片。从图2a可以看出，未处理的BF表面附着果胶等杂质，这些物质不易与PP黏结。从图2b可以看出，N-BF表面果胶被去除，表面变得洁净，纤维束完全裸露。同时，碱性作用在纤维表面形成部分腐蚀沟槽，增加了粗糙度，这有助于BF与改性剂及PP树脂的浸润[19,22]。从图2c和图2d可以看出，K-BF和T-BF表面均出现明显褶皱，二者的表面粗糙度均高于N-BF的表面粗糙度，提高了BF与PP的相容性，有助于BF与PP基体结合和锚固。

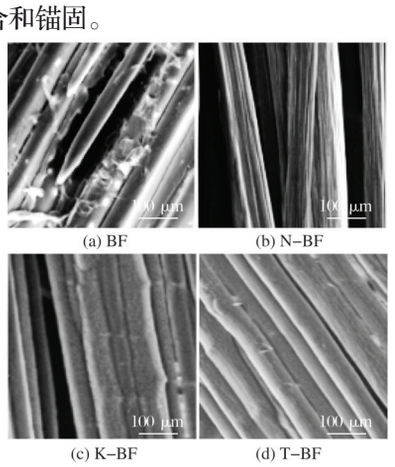


图2 不同处理方式下BF的SEM照片(400×)

Fig.2 SEM images of BF under different processing methods (400×)

2.2 BF与PP的相容性

图3为PP/BF复合材料断面的SEM照片。从图3a可以看出，存在BF被拔出留下的孔洞以及大量裸露的BF，裸露的BF表面包裹的PP树脂极少且部分BF距离较近。这是因为未处理的BF与PP相容性较差，PP树脂包裹BF不充分，BF与PP树脂界面黏结力弱，BF分散性不好，可能出现团聚的现象，在外力作用下容易被拔出。NaOH除去BF表面果胶等杂质后，BF表面粗糙度增加，BF更容易与PP基体浸润和结合，界面黏结性更强。从图3b和图3c可以看出，K-BF和T-BF表面与PP基体的相容性进一步提高，BF被拔出比例明显减少，复合材料断面结构的均匀性和致密性明显提高。

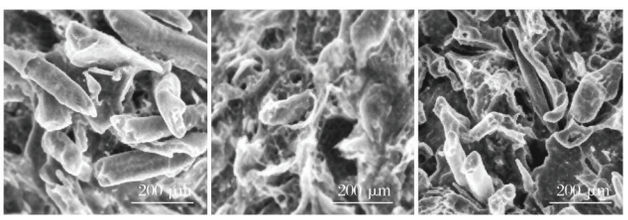


图3 PP/BF复合材料断面的SEM照片(500×)

Fig.3 SEM images of cross-section of PP/BF composites (500×)

通过以上分析可知，改性剂分子通过与BF表面的羟基键合或分子缠绕等作用，包覆到BF表面，降低BF表面与PP结合的表面能，提高相容性[23-25]。但是KH550和TECA增强BF与PP相容性的机理有所不同。

(1) KH550增强机理。KH550主要通过界面化学反应和极性匹配机制提高BF与PP之间的相容性[21,26]。界面化学反应：KH550分子中Si—OH与BF表面—OH发生缩合反应，形成稳定的Si—O—C共价键，使KH550牢固接枝于BF表面。极性匹配：KH550分子结构中的氨基(极性基团)可与PP分子链通过范德华力或氢键相互作用，降低BF(极性)与PP(非极性)之间的界面张力，减少两相分离趋势。

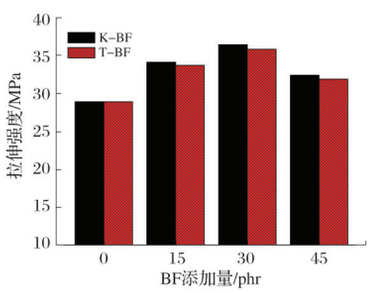
(2) TECA增强机理。TECA分子结构含亲无机基团(如烷氧基—OR)和长链亲有机基团，因此TECA主要通过化学键合锚固和“分子双向桥联”作用改善BF(极性)与PP(非极性)的界面相容性[27]。化学键合锚固：TECA的—OR与BF表面—OH发生酯化反应，生成Ti—O—C共价键，使TECA分子牢固接枝于BF表面，取代部分极性—OH，降低BF表面极性。分子双向桥联：TECA的亲有机基团(如长链烷基)与PP分子链结构相似，通过范德华力或分子链缠结作用与PP基体结合，消除BF与PP之间的界面张力差异，实现两相界面的“柔性过渡”，减少界面分离。

2.3 PP/BF复合材料的力学性能

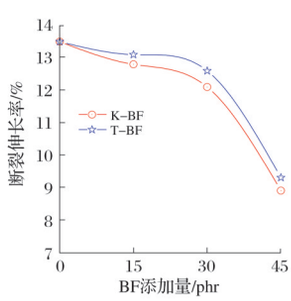
2.3.1 拉伸强度和断裂伸长率

图4为PP/BF复合材料的拉伸强度和断裂伸长率。从图4a可以看出，经过改性剂处理的BF所制备复合材料的拉伸强度高于PP。当BF添加量相同时，添加K-BF的复合材料拉伸强度大于添加T-BF的复合材料。从图4b可以看出，加入BF后，复合材料的断裂伸长率不断降低且始终低于PP，这是因为BF自身断裂伸长率较低，抑制了复合材料的断裂伸长率。但是，在相同BF添加量下，添加T-BF的复合材料断裂伸长率大于添加K-BF的复合材料。经过不同改性剂处理的BF加入PP中，复合材料的拉伸强度均是先增大后降低，而断裂伸长率不断降低。当K-BF和T-BF添加量均为30 phr时，复合材料拉伸强度最大，与PP相比，

拉伸强度分别提高26.0%和23.9%，断裂伸长率分别降低10.4%和6.7%。继续增加改性BF添加量超过30 phr后，拉伸强度和断裂伸长率迅速降低。这是因为改性后的BF与PP的相容性提高，有利于BF与PP基体的机械啮合。随着改性BF添加量的增加，BF与PP逐渐形成网络整体，在受到外部荷载时，荷载通过BF与PP的界面层进行传递，应力被分散。同时，BF作为纤维还有抑制裂纹扩展的作用，因此拉伸强度得到提高。但是，随着改性BF添加量的继续增加，BF在PP基体中会出现团聚现象，形成界面薄弱区和内部缺陷，降低复合材料的整体性和PP的连续性，造成应力集中，因此拉伸强度出现下降趋势[28]。由于BF断裂伸长率较低，过量的BF还会出现团聚现象，使PP基体产生缺陷。因此，随着BF添加量的增加，复合材料的断裂伸长率不断降低。



(a) 拉伸强度



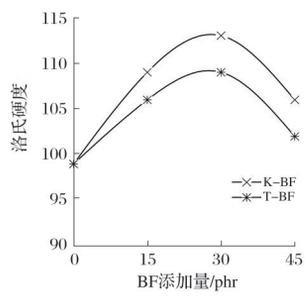
(b) 断裂伸长率

图4 PP/BF复合材料的拉伸强度和断裂伸长率

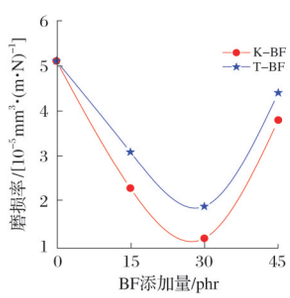
Fig.4 Tensile strength and elongation at break of PP/BF composites

2.3.2 硬度和耐磨性能

图5为PP/BF复合材料的洛氏硬度和磨损率。从图5可以看出，加入不同改性剂处理的BF后，复合材料的洛氏硬度均高于PP，而磨损率均低于PP。当BF添加量相同时，添加K-BF的复合材料洛氏硬度大于添加T-BF的复合材料。这是因为BF经NaOH和改性剂处理后，BF的表面粗糙度增加，BF与PP的相容性提高，有利于BF与PP基体的机械啮合和锚固。同时，BF的比强度较高，能够进一步提高复合材料的整体硬度。随着改性BF添加量的增加，BF与PP逐渐形成网络整体，在受到摩擦荷载时，荷载通过BF与PP的界面层进行传递，BF承担了部分荷载。同时，BF作为纤维还有抑制裂纹扩展的作用，在摩擦放热过程中BF还能抑制PP分子受热运动，因此复合材料的硬度增大，磨损率降低。随着改性BF添加量增加，复合材料的洛氏硬度先增大后降低，磨损率先降低后增大。当K-BF或T-BF添加量均为30 phr时，复合材料硬度和耐磨性能最佳，与PP相比，洛氏硬度分别提高14.1%和10.1%，磨损率分别降低76.5%和62.7%。这是因为改性BF添加量一定时，BF对复合材料体系的力学性能的增强作用占主导，因此改性BF添加量不超过30 phr时，洛氏硬度逐渐增大，磨损率逐渐降低。但当改性BF添加量超过30 phr时，BF在PP基体中会出现团聚现象，形成界面薄弱区，降低复合材料的整体性和PP的连续性。同时，团聚的BF容易在复合材料内部形成缺陷，造成力学性能降低。因此，过量的BF会导致复合材料洛氏硬度下降，磨损率增大[26]。



(a) 洛氏硬度



(b) 磨损率

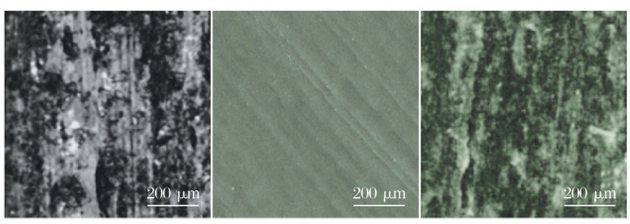
图5 PP/BF复合材料的洛氏硬度和磨损率

Fig.5 Rockwell hardness and wear rate of PP/BF composites

图6为磨损率测试试样表面SEM照片。从图6a可以看出，PP表面出现严重的划痕与沟槽，出现变形现象。这是因为PP表面硬度偏低，在摩擦荷载下容易引起划痕和沟槽，而摩擦过程中会放热，PP表面受热会发生表层软化，因此出现了变形。从图6b和图6c可以看出，加入改性BF后，复合材料表面光滑度变高，沟槽变少，尤其经K-BF制备的复合材料表面光滑度更高，沟槽更少。这表明复合材料硬度增大，耐磨性能提高，这与图5结果一致。

复合材料力学性能分析表明，不同改性剂对其性能的影响存在显著差异。与T-BF相比，K-BF能更显著地提升复合材料的刚性，但在柔性方面表现较差，因此K-BF制备的复合材料拉伸强度、硬度和耐磨性更强，而断裂伸长率则更小。其主要原因如下：(1)增强机理存在差异。KH550通过与BF的—OH发生缩合反应，形成稳定的Si—O—C共价键，同时其氨基与PP分子链通过范德华力或氢键相互作用，实现BF与PP的连接。相比之下，TECA通过酯化反应与BF的—OH形成Ti—O—C共价键，其亲

有机长链则与PP分子链通过范德华力或缠结作用相结合。TECA的长链烷基在界面处形成“弹性缓冲层”,在受到冲击时可通过链段运动吸收能量,减少脆性断裂,从而改善复合材料的冲击韧性。(2)分子结构存在区别。KH550为线性短链结构,而TECA含有长烷基链,其长链结构的柔性强于KH550的短链。此外,Si—O—C共价键的键能更高,刚性更强;而Ti—O—C共价键则赋予复合材料更好的柔性。



(a) PP (b) PP/K–BF(30) (c) PP/T–BF(30)

图6 磨损率测试试样表面SEM照片(400×)

Fig.6 Surface SEM images of wear rate test samples (400×)

3 结论

经NaOH处理后,N-BF表面纤维束完全裸露,粗糙度明显增加;经KH550和TECA进一步改性后,K-BF和T-BF的表面粗糙度均高于N-BF。未处理的BF与PP基体相容性较差,BF被大量拔出,且拔出纤维表面附着的PP极少。而K-BF和T-BF与PP的界面相容性显著改善,BF拔出比例明显降低,复合材料断面的均匀性和致密性显著提高。经改性剂处理后,复合材料的拉伸强度、硬度和耐磨性能均得到提升。在相同BF添加量下,添加K-BF的复合材料的拉伸强度、洛氏硬度和耐磨性能均高于添加T-BF的复合材料,而断裂伸长率则相反。当改性BF添加量为30 phr时,复合材料的拉伸强度、洛氏硬度和耐磨性能最佳。与PP相比,添加K-BF和T-BF的复合材料拉伸强度分别提高26.0%和23.9%,洛氏硬度分别提高14.1%和10.1%,磨损率分别降低76.5%和62.7%,断裂伸长率分别降低10.4%和6.7%。不同改性剂对复合材料性能的增强效果不同。K-BF更有利于提升复合材料的拉伸强度、硬度和耐磨性能,但断裂伸长率较低;T-BF则能使复合材料保持较好的断裂伸长率。因此,当优先保证拉伸强度、硬度和耐磨性能时,建议选用KH550;当优先保证断裂伸长率时,建议选用TECA。

参考文献

[1] 王莹. 透明抗冲聚丙烯的制备及应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.

[2] 王鑫, 蒋敏, 陈思月, 等. 聚丙烯复合材料界面增强的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 127-131.

[3] 花超然. 高强高韧等规聚丙烯材料及其结构与性能关系的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.

[4] 李帅, 郑超, 王薪荣, 等. 层状纳米硅酸盐增强聚丙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 94-98.

[5] 李德军, 罗华林, 杜建强. 不同类型弹性体改性聚丙烯的结构与性能[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(4): 53-56.

[6] SYAFIQ R, SAPUAN S M, ZUHRI M R M. Antimicrobial activity, physical, mechanical and barrier properties of sugar palm based nanocellulose/starch biocomposite films incorporated with cinnamon essential oil[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 144-157.

[7] 詹婷, 任津源, 彭尧, 等. 竹纤维粒径与比例对石竹塑复合材料的性能影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 131-140.

[8] 詹绍彬, 毛钱鑫, 童文瑄, 等. 竹纤维长径比及含量对环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2023, 51(12): 82-87.

[9] 陶永亮, 曾成均. 竹纤维增强聚丙烯复合材料研究与应用进展[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(5): 111-116.

[10] 彭聪聪. 竹纤维复合材料在绿色建筑中的应用[J]. 河北能源职业技术学院学报, 2024, 24(1): 78-81.

[11] 韩雨潼, 王旷, 卜香婷, 等. 长竹纤维束定向增强聚丙烯复合材料[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 17-23.

[12] 左迎峰, 李萍, 刘文杰, 等. 碱处理对竹纤维/聚乳酸可降解复合材料性能影响研究[J]. 功能材料, 2018, 49(2): 2006-2012.

[13] 茹燕平, 崔萍, 张昭环, 等. 竹纤维复合材料薄板的性能研究及优化[J]. 纺织科技进展, 2020, 42(12): 19-23.

[14] 江太君, 胡灿, 曾广胜. 竹纤维/聚丙烯复合材料应力松弛时间的实验表征[J]. 塑料工业, 2021, 49(6): 138-142.

[15] 付常青, 燕韵天, 常旬, 等. 环氧树脂/竹纤维复合材料性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 13-19.

[16] 周吓星, 洪国新, 王明光, 等. 竹粉/废旧聚乙烯复合材料的性能[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 208-213.

[17] 常旬, 查贵铧, 孙呵, 等. 改性方法对竹束纤维及其增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2023, 51(1): 123-129.

[18] DUN M Y, HAO J X, WANG W H, et al. Sisal fiber reinforced high density polyethylene pre-preg for potential application in filament winding[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 159: 369-377.

[19] GIERLINGER N, GOSWAMI L, SCHMIDT M, et al. *In situ* FT-IR microscopic study on enzymatic treatment of poplar wood cross-sections[J]. Biomacromolecules, 2008, 9(8): 2194-2201.

[20] 黎晨欣, 王爽, 肖容慧, 等. 竹纤维碱化改性对竹纤维/聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 上海第二工业大学学报, 2020, 37(4): 279-285.

[21] DONG J Q, ZHOU W R, SU Y H, et al. Enhanced mechanical, thermal, and barrier properties of poly (3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyhexanoate)/montmorillonite nanocomposites using silane coupling agent[J]. Polymer Composites, 2020, 41(11): 4538-4549.

[22] 周吓星, 黄舒晟, 陈礼辉, 等. 竹粉增强聚丙烯复合材料的吸水性和表面润湿性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(2): 208-212.

[23] GAUVIN F, RICHARD C, ROBERT M. Modification of bamboo fibers/bio-based epoxy interface by nano-reinforced coatings[J]. Polymer Composites, 2018, 39(5): 1534-1542.

[24] RAO F, JI Y H, LI N, et al. Outdoor bamboo-fiber-reinforced composite: Influence of resin content on water resistance and mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120022.

[25] 杜西兰, 熊一鸣, 靳进波, 等. 植物纤维表面改性及PP复合材料力学性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(8): 114-117.

[26] 周吓星, 范宏玥, 童文瑄, 等. 硅烷用量对竹原纤维增强复合材料性能的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(6): 659-666.

[27] 金霄, 张效林, 邓祥胜, 等. 竹纤维增强热塑性塑料复合材料研究进展[J]. 中国塑料, 2017, 31(10): 6-11.

[28] 曾广胜, 徐成, 林瑞珍, 等. 植物纤维增强聚丙烯复合材料力学性能的研究[J]. 包装学报, 2011, 3(1): 44-47.