

# 纳米 $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ 增强竹塑复合材料制备及托盘应用性能仿真分析

牛一米，杜鑫宇，于孟言，洪伟淇，高 珊\*

(东北林业大学土木与交通学院，哈尔滨 150040)

**摘 要：**随着生物质复合材料性能研究的不断深入，其在农业工程中的应用也逐渐广泛。该研究旨在提升竹塑复合材料 (bamboo-plastic composites, BPC) 力学性能和耐老化性，以实现其托盘制品的环保和应用性。首先，该研究采用三种不同配比竹粉 (bamboo fiber, BF) 与高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE) 制备 BPC，并进行力学性能测试确定 BF 与 HDPE 最优配比。通过  $\text{SiO}_2$  包覆  $\text{TiO}_2$  粒子 ( $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ )，硅烷偶联剂 KH550 改性  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  制备 KH550-ST，采用喷涂法用 KH550-ST 改性 BPC<sub>55</sub> 制备纳米增强竹塑复合材料 (KH550-ST-BPC)，并进行力学性能和耐光老化性能分析。运用 ANSYS Workbench 软件对改性前后的 BPC 一体式托盘进行有限元仿真分析，理论验证纳米改性 BPC 托盘的应用性能。结果表明，随着 BF 含量的增加，BPC 的抗拉性能和抗弯性能均有所提高。在 BF 与 HDPE 质量比为 5:5 时 (BPC<sub>55</sub>)，BPC 力学性能最优。相比于 BPC<sub>55</sub>，KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 弯曲强度和弯曲模量分别提升了 31.11% 和 52.27%，拉伸强度和拉伸模量分别提升 11.86% 和 21.92%，KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的耐光老化性能提升 77.79%。通过有限元仿真，发现 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 制 BPC 托盘在额定荷载下堆码仿真产生的最大变形量降低 27.36%，极限荷载下降 23.41%，即可有效的堆码工况下的承载能力。该研究可为纳米  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  增强竹塑复合材料做物流周转单元的应用提供参考。

**关键词：**力学性能；复合材料；有限元仿真；周转托盘

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406215

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0278-10

牛一米，杜鑫宇，于孟言，等. 纳米  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  增强竹塑复合材料制备及托盘应用性能仿真分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 278-287. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406215 <http://www.tcsae.org>

NIU Yimi, DU Xinyu, YU Mengyan, et al. Preparation of nano- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  reinforced bamboo-plastic composites and simulation analysis of performance for pallet application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 278-287. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406215 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

由于中国有丰富的竹材资源，因此竹基生物质材料和产品的研发越来越受到广泛的关注，竹塑复合材料 (bamboo-plastic composites, BPC) 作为性能优异和环境友好的新型生物质复合材料，在生产生活当中逐步向“以竹代塑”的目标行进<sup>[1-2]</sup>。《“十四五”现代物流发展规划》的出台，加速了绿色物流的发展。节能减排、循环包装及托盘共享等理念对物流周转单元的生产资源和应用性能提出了新的要求<sup>[3]</sup>。由于传统木质托盘的原材料供给不足和塑料托盘生产的环境污染问题，促使物流产业正着力寻求性能更好且原材料可持续供应的替代品<sup>[4-5]</sup>。因此，竹塑复合材料在环保和可持续生产和循环使用的托盘制造有了一定的市场。目前已有部分企业利

用竹材边角料和回收塑料，成功生产出高强度、低成本且环保的竹塑托盘，成为当地竹产业链升级和绿色物流发展的新趋势<sup>[6]</sup>。

目前市场上的竹塑复合材料主要是由天然竹纤维 (BF) 与热塑性聚合物如聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚丙烯 (polypropylene, PP) 和聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 等材料经热压等技术复合制备而成<sup>[7]</sup>。Song 等<sup>[8]</sup>通过极差分析法确认了竹粉含量对复合材料力学性能影响显著。薛一帆等<sup>[9]</sup>发现当竹粉占比达 50% 时，聚乳酸基 BPC 的拉伸和弯曲强度达到最大值。竹纤维含量较低会降低力学性能，较高会提升材料吸水性，塑料含量高会增加成本<sup>[10-11]</sup>。竹纤维的亲水性和塑料的疏水性会造成界面不兼容，削弱 BPC 的机械性能<sup>[12]</sup>。但是通过添加聚乙烯蜡 (polyethylene wax, PE wax) 作为润滑剂<sup>[13]</sup>和马来酸酐聚乙烯 (maleic anhydride grafted polyethylene, PE-g-MAH) 可以改善竹纤维和塑料的相容性<sup>[14]</sup>。通过化学和物理对纤维表面改性方法，亦能够较好改善纤维和塑料的相容性<sup>[15]</sup>。其中化学改性多以偶联剂改性<sup>[16]</sup>、接枝共聚合和化学处理等方法为主<sup>[17]</sup>。物理改性方法主要包括纳米颗粒填充<sup>[18]</sup>、等离子处理和热处理等<sup>[15]</sup>。其

收稿日期: 2024-06-29 修订日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32471790, 32071685)

作者简介: 牛一米，研究方向为生物质基纳米增强复合材料、木质林产品质量无损检测。Email: 752930175@qq.com

\*通信作者: 高珊，副教授，博士，研究方向为木材无损检测与评价、林产品物流、生物质能源利用。Email: gaoshan\_2000@126.com

中纳米颗粒填充和化学改性不可完全独立。例如, 纳米  $\text{TiO}_2$  具有化学稳定性、抗老化、抗菌特性等优异条件, 常被用于增强植物纤维复合材料的相应性能<sup>[19-20]</sup>, 其中金红石型  $\text{TiO}_2$  性能最好, 比较受青睐<sup>[21]</sup>。但纳米颗粒  $\text{TiO}_2$  之间的范德华力和库仑力相互作用会导致团聚现象<sup>[22]</sup>, 且  $\text{TiO}_2$  光催化活性会在吸收紫外线后产生自由基, 也容易导致复合材料的氧化和降解<sup>[23]</sup>。已有研究表明通过表面处理技术, 将纳米  $\text{SiO}_2$  覆在纳米  $\text{TiO}_2$  表面上, 减少粒子团聚, 抑制光催化活性, 获得具有紫外吸收能力的  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  颗粒<sup>[24-25]</sup>。使用硅烷偶联剂进行表面处理也可改善相容性<sup>[26]</sup>, 其能通过水解反应与无机材料形成化学键, 降低表面能并在有机相和无机相之间形成稳定的键<sup>[27]</sup>。但将此方法运用到竹-塑复合过程的研究还鲜有, 尤其是在硅烷偶联剂助力  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  颗粒改性竹-塑复合效果的研究更是少见。

因此, 本研究发展一种环保、应用性能好且使用寿命较长的物流周转单元为目标, 通过纳米改性竹塑复合材料, 提高其力学性能和耐光老化性能。并利用有限元模拟仿真最终纳米改性竹塑复合托盘的力学承载能力、质量和应用性能<sup>[28-29]</sup>, 以满足托盘应用的国家标准。同时通过优化设计, 在满足国标的基础上, 实现轻质、轻量且成本节约的一体式托盘, 为纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  增强竹塑托盘材料的生产和应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

竹粉 (BF): 0.18 mm, 江西智行千里新材料有限公司; 高密度聚乙烯 (HDPE): 牌号 5000S, 密度 0.949~0.953 g/L, 熔融指数 0.08~0.11 g/min, 中国石化扬子石油化工有限公司; 聚乙烯蜡: WL-102, 东莞山一塑化有限公司; 马来酸酐接枝聚乙烯 (PE-g-MAH): 牌号 HT-0815, 密度 0.91~0.94 g/L, 熔融指数 0.15~0.17 g/min, 宁波涛涛塑化有限公司; 金红石型纳米  $\text{TiO}_2$ : 50 nm, 质量分数为 99.5%, 麦克林试剂公司; 硅烷偶联剂 KH550: 分析纯, 麦克林试剂公司; 四乙氧基硅烷 (tetraethoxysilane, TEOS)、氨水和无水乙醇: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 竹塑不同配比的 BPC 的制备

竹塑复合材料制备的已有研究中的竹纤维含量多围绕在 30%~50%, 因此, 本试验采用的竹纤维 (BF) 与高密度聚乙烯 (HDPE) 质量比分别为 3:7 (BPC<sub>37</sub>)、4:6 (BPC<sub>46</sub>) 和 5:5 (BPC<sub>55</sub>)。首先, 将竹粉放在电热恒温鼓风干燥箱 (DHG-9625A, 上海一恒科学仪器有限公司) 中 103 °C 的条件下烘干 48 h, 保存于真空袋。随后, 依次按照 30:70:4:2、40:60:4:2、50:50:4:2 的质量比例称取竹粉、HDPE、PE-g-MAH 和 PE 蜡。所有材料在高速混料机 (SHR-10A, 张家港通沙塑机公司) 中充分搅拌; 将混合物料放入在双螺杆挤出机 (SJSH30, 南京橡塑机械厂) 高温熔融混炼挤出, 之后在粉碎机

(FZ102, 天津泰斯特仪器有限公司) 中粉碎成细颗粒。挤出过程中, 双螺杆挤出机 1~7 区温度分别为 155、160、165、170、170、160 和 150 °C。取适量的粒料, 放置于不锈钢垫板上, 手工铺装成板坯, 随后放入热压机 (SL-406B, 东莞市卓胜机械设备有限公司) 中。在 175 °C 下预热 5 min, 接着在 175 °C、8 MPa 条件下热压 5 min, 最后进行冷压成型, 控制板材厚度为 4 mm, 得到竹塑不同配比的 BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>55</sub> 竹塑复合材料板条。

#### 1.2.2 纳米 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 的制备

参考文献研究配比<sup>[30]</sup>, 本研究将金红石型纳米  $\text{TiO}_2$  粉末与无水乙醇以 1:20 的质量比混合, 在室温下利用超声波分散仪 (JY-1200Y, 无锡久平仪器有限公司) 处理 30 min; 将  $\text{TiO}_2$  分散液转移至 250 mL 三口烧瓶中, 向溶液中滴加 20 mL TEOS 溶液, 分批次加入氨水调整 pH 值至 10。随后在 35 °C 恒温水浴下反应 4 h, 反应结束后将反应液冷却, 离心收集  $\text{SiO}_2$  包覆后的纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒, 用去离子水和无水乙醇交替洗涤 3 次, 最后在 60 °C 真空干燥箱中干燥 12 h, 得到  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  粉末。

#### 1.2.3 硅烷偶联剂改性纳米 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 的制备

由于在前期试验中已经发现偶联剂 KH550 质量分数为 5% 时, KH550-ST 的改性效果较好。因此, 本试验中选用的硅烷偶联剂 KH550 质量分数为 5%。取干燥后的纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  粉末与无水乙醇以 1:10 的质量比混合, 超声波分散仪处理 30 min, 超声功率 600 W; 将占纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  粉末质量 5% 的 KH550, 加入到无水乙醇和去离子水体积比为 8:2 的混合溶液中, 多次实验中该比例下偶联剂分散较均匀<sup>[31]</sup>, 搅拌均匀后加入到含有纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  的无水乙醇溶液中<sup>[32]</sup>。将混合溶液置于 60 °C 的水浴中, 并放入搅拌器 (DF-101S, 巩义市予华仪器有限责任公司) 充分搅拌 2 h; 高速离心 10 min, 离心转速为 4 000 r/min。随后在无水乙醇中洗涤 4 次, 去除未反应的偶联剂和其他杂质。最后, 将洗涤后的纳米粒子放入 60 °C 的真空烘箱中干燥 24 h, 最终获得 KH550 改性的纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  颗粒。以 KH550-ST 表示硅烷偶联剂改性的纳米  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 。

#### 1.2.4 KH550-ST 改性 BPC<sub>55</sub> 试验

在前 3 步试验结果确定 BPC<sub>55</sub> 的力学性能最优, 前期试验中 KH550-ST 质量分数为 3% 时 BPC 性能最优的基础上, 采用占 BPC<sub>55</sub> 总质量 3% 的 KH550-ST 进行喷涂。首先, 将 KH550-ST 粉末溶解于去离子水中, 并用超声波分散仪处理 1 h。然后用喷枪将溶液均匀喷涂于预先烘干的竹粉表面, 并在喷涂过程中持续搅拌。喷涂后的竹粉在 103 °C 的条件下干燥 24 h, 控制其含水率在 3% 以内。之后, 将处理后的竹粉与 HDPE 以及聚乙烯蜡和马来酸酐接枝聚乙烯 (PE-g-MAH) 等助剂进行混合、挤出造粒并热压成型。用 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 来表示 KH550-ST 改性后的 BPC<sub>55</sub> 竹塑复合材料。

### 1.3 性能测试与表征

#### 1.3.1 抗弯性能测试

采用电子万能力学试验机 (SANS-CMT5504, 深圳

市新三思计量技术有限公司), 参照 GB/T 9341-2008<sup>[33]</sup> 对 BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub>、BPC<sub>55</sub>、KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 试样进行弯曲性能的测定, 试件尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。测试加载速度为 2 mm/min, 跨距 64 mm。每组测试 6 个试件, 结果取平均值。

### 1.3.2 抗拉性能测试

使用电子万能力学试验机 (SANS-CMT5504, 深圳市新三思计量技术有限公司), 根据 GB/T1040.2-2022<sup>[34]</sup> 对 BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub>、BPC<sub>55</sub>、KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 试件进行拉伸性能的测定。试样裁切为哑铃型试件, 尺寸为长 150 mm, 宽部 20 mm, 窄部 10 mm, 厚度 4 mm, 标距 50 mm。测试速度为 1 mm/min。每组测试 5 个试件, 结果取平均值。

### 1.3.3 表面形貌观测

采用扫描电子显微镜 (Apreo S, 赛默飞世尔科有限公司) 观察 BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub>、BPC<sub>55</sub>、KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 试样的表面形貌。测试前在液氮中对试样进行脆断, 断面表面均匀喷金, 在 12.5 kV 的加速电压和 2 μm 的放大倍率条件下, 观察试样界面的形貌和纳米粒子的分布情况。

### 1.3.4 耐光老化性能测试

采用 IA 型 (UVA-340) 紫外线荧光灯, 参照 GB/T 16422.3-2022<sup>[35]</sup>, 使用 340 nm、0.76 W/m<sup>2</sup> 强度, 对 BPC<sub>55</sub>、KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 试样进行紫外老化测试。

采用 CM-2300 d 型分光测色仪测定不同老化时间试样的色差值。采用 CIE 标准色度系统, 对比老化前后的颜色差异, 测试颜色时取 5 个测试样本, 每个样本取 3 个点进行测试, 共计 15 次<sup>[36-37]</sup>。

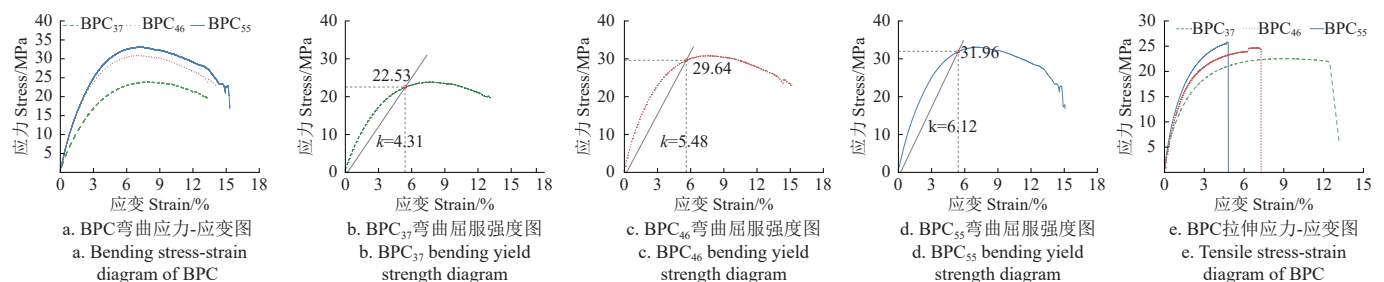
## 2 结果与分析

### 2.1 不同配比竹塑复合材料及其性能分析

#### 2.1.1 力学性能分析

##### 1) 弯曲应力-应变

不同 BF 与 HDPE 配比的 BPC (BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>55</sub>) 材料的弯曲应力-应变如图 1a 所示。在初始荷载阶段均呈线性增长趋势, 这一阶段为材料的弹性响应阶段; 当应力值超过材料的屈服点后, 材料进入塑性阶段, 应变随应力的增加而降低, 直至材料断裂。在同等应力条件下, BPC<sub>55</sub> 的应变明显低于 BPC<sub>37</sub> 和 BPC<sub>46</sub>, 表明在相同应力水平下, BPC<sub>55</sub> 抵抗弯曲变形的能力更强。在约 7.5% 的应变水平处, 3 种配比的 BPC 达到最大应力值, 由高到低依次排列为 BPC<sub>55</sub>、BPC<sub>46</sub>、BPC<sub>37</sub>。从应力应变发展趋势及应力峰值分布可以看出, BF 与 HDPE 配比为 5:5 时的 BPC<sub>55</sub> 材料的抗弯模量和极限强度等抗弯性能最优。这表明随着竹粉含量的增加, 可有效提高竹塑复合材料的抗弯强度, 提高其托盘制品的承载能力。



注: 图中斜率 ( $k$ ) 代表材料的弹性模量。

Note: The slope ( $k$ ) in the figure represents the elastic modulus of the material.

图 1 不同配比 BPC (bamboo-plastic composites) 的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of BPC with different ratios

#### 2) 屈服强度

材料屈服强度是判定托盘抵抗应力破坏的关键指标。通过采用 0.2% 偏移法来确定材料屈服强度, 如图 1b~1d 所示。从图 1b~1d 的 BPC<sub>55</sub>、BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>37</sub> 的弯曲屈服强度图可以明显看出: BPC<sub>55</sub>、BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>37</sub> 的屈服强度分别为 31.96、29.64 和 22.53 MPa, 表明 BPC<sub>55</sub> 在塑性变形前能够承受更大应力。这说明, 随着竹粉含量增加, 相同受力情况下, 竹塑复合材料抵抗塑性破坏的能力越强。

#### 3) 弯曲强度及弯曲模量

3 种配比 BPC 弯曲性能如表 1 所示, 竹粉含量提高, BPC 的弯曲强度和弯曲模量逐渐升高。BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 及 BPC<sub>55</sub> 弯曲强度分别达到 23.98、30.93 和 33.17 MPa; 弯曲模量分别为 811、1290 和 1316 MPa。与 BPC<sub>37</sub> 对比, BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>55</sub> 的弯曲强度分别提高了 28.98% 和 38.34%,

弯曲模量分别提升了 58.97% 和 62.19%, 均显著提高 ( $P < 0.01$ ), 见表 1。因此, BF 与 HDPE 配比为 5:5 时的 BPC<sub>55</sub> 具有最优抗弯性能。这是因为竹纤维具有较高的韧性和抗弯模量, 随着竹粉含量的增加, 竹塑复合材料的韧性有所提升, 弥补了纯 HDPE 的韧性不足, 使得 BPC 材料即使在较高的负载下也不易断裂, 这与周吓星等针对竹粉/废旧聚乙烯复合材料改性的结果基本一致<sup>[38]</sup>。

#### 4) 拉伸应力-应变

如图 1e 所示, 显示了不同 BF 与 HDPE 配比的 BPC (BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>55</sub>) 的拉伸应力-应变图。在超过拉伸屈服应力后, 所有试样均进入塑性变形阶段。当应变持续增加并到达最大应力点, 此点会产生裂纹, 最终断裂。BPC<sub>55</sub> 和 BPC<sub>46</sub> 塑性应变阶段较短, BPC<sub>37</sub> 塑性阶段较长, 在拉伸至断裂的过程中能够产生更大的应变。这是由于 HDPE 高断裂伸长率, 使材料在拉伸过程中能



够承受极大形变而不断裂<sup>[39]</sup>。因此。HDPE 的含量越高，BPC 的延展性就越强。

5) 拉伸强度和拉伸模量

由表 1 可知，不同 BF 与 HDPE 配比的 BPC 拉伸强度和模量随竹粉含量增加而增强，各组之间存在显著性差异 ( $P<0.01$ )。BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 及 BPC<sub>55</sub> 的拉伸强度分

别为 22.31、24.55 和 25.65 MPa。与 BPC<sub>37</sub> 相比，BPC<sub>46</sub> 拉伸强度提高 10.02%，BPC<sub>55</sub> 提高 14.95%。BPC<sub>37</sub>、BPC<sub>46</sub> 及 BPC<sub>55</sub> 拉伸模量分别为 797、1 185 及 1 604 Mpa；BPC<sub>46</sub> 和 BPC<sub>55</sub> 的拉伸模量相比 BPC<sub>37</sub> 分别提高 48.63% 和 101.18%。表明 BF 与 HDPE 配比为 5:5 时，BPC<sub>55</sub> 的抗拉性能最优。

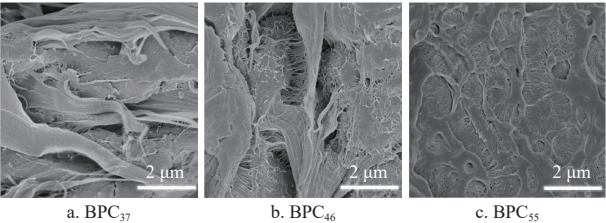
表 1 不同配比 BPC 的弯曲性能和拉伸性能  
Table 1 Bending and tensile properties of BPC with different ratios

样品 Samples	弯曲性能 Bending property			拉伸性能 Tensile property			
	最大荷载 Maximum load/N	弯曲强度 Bending strength/MPa	弯曲模量 Bending modulus/MPa	最大荷载 Maximum load/N	拉伸强度 Tensile strength/MPa	拉伸模量 Tensile modulus/MPa	平均泊松比 Average poisson ratio
BPC <sub>37</sub>	24.34±1.14	23.98±0.94 <sup>c</sup>	811±111.13 <sup>b</sup>	1 098.44±22.53	22.31±0.21 <sup>c</sup>	797±5 <sup>c</sup>	0.45±0.03
BPC <sub>46</sub>	37.49±1.98	30.93±1.01 <sup>b</sup>	1 290±69.96 <sup>a</sup>	1 191.65±30.98	24.55±0.35 <sup>b</sup>	1 185±46 <sup>b</sup>	0.41±0.09
BPC <sub>55</sub>	39.89±1.76	33.17±0.45 <sup>a</sup>	1 316±127.86 <sup>a</sup>	1 268.12±19.76	25.65±0.15 <sup>a</sup>	1 604±49 <sup>a</sup>	0.42±0.05

注：表中数据为平均值±标准差。在同类指标的比较中，不同字母代 a、b、c 表数据间有差异性水平，字母不同，差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Data in the table are mean ± standard deviation. In the comparison of the same type of index, data with different letters are significantly different ( $P<0.05$ ).

2.1.2 扫描电镜分析

扫描电镜图像 (scanning electron microscope, SEM) 可用来观察竹纤维和 HDPE 之间界面结构。图 2 为不同竹塑配比的 BPC 表面形貌图。BPC<sub>37</sub> 样本中，断面存在明显的空隙和孔洞，这是因为内部结构非均质性，空隙和孔洞不仅降低了界面结合强度，还成为应力集中点，受力时更易破坏。在 BPC<sub>46</sub> 中，竹纤维在基体中的分布较均匀，竹纤维与 HDPE 基体结合较紧密，但仍存在空洞和间隙。在进一步提高竹粉含量时，BPC<sub>55</sub> 界面结合变得更平整，间隙减少，纤维分布更加均匀。因此，增加了竹塑复合材料力学性能的提升。



注：37、46、55 分别代表竹纤维与 HDPE 质量比为 3:7、4:6、5:5。  
Note: 37, 46 and 55 represent the mass ratios of bamboo fiber to HDPE of 3:7, 4:6 and 5:5, respectively.

图 2 不同配比 BPC 扫描电镜图  
Fig.2 SEM images of BPC with different ratios

2.2 纳米增强竹塑复合材料性能分析

针对前期研究获得的 BF 与 HDPE 最优配比的进行纳米改性，以进一步增强其性能。改性前 (BPC<sub>55</sub>) 和经 KH550-ST 改性后的 BPC<sub>55</sub> (KH550-ST-BPC<sub>55</sub>) 性能分析如下。

2.2.1 力学性能分析

1) 弯曲性能分析

BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的力学性能对比如图 3 所示。BPC<sub>55</sub> 的弯曲强度与模量分别为 33.17 MPa 和 1.32 GPa；改性后的 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的弯曲强度和模量分别提高至 43.49 MPa 和 2.01 GPa，弯曲强度和模量分别提升了 31.11%，52.27%。这表明在相同应力条件下，KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 抵抗弯曲变形的能力强于 BPC<sub>55</sub>，添加纳米 KH550-ST

有效增强了 BPC<sub>55</sub> 的抗弯性能。

2) 拉伸性能分析

如图 3 所示，BPC<sub>55</sub> 的拉伸强度为 25.65 MPa，拉伸模量为 1.60 GPa；KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 拉伸强度和拉伸模量分别为 28.69 MPa、1.96 GPa，分别提升 11.86%、21.92%。KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 抗拉性能更好。这主要是因为为纳米颗粒的高表面体积比，增加了颗粒与聚合物基体之间的接触表面<sup>[40]</sup>。硅烷偶联剂中的活性基团与纳米颗粒表面发生羟基反应，优化纳米颗粒在基体中的分散性，减少纳米颗粒间的直接接触和团聚现象，增强纳米颗粒与聚合物基体间的应力传递效率，从而有效提高了竹塑复合材料整体的力学性能。

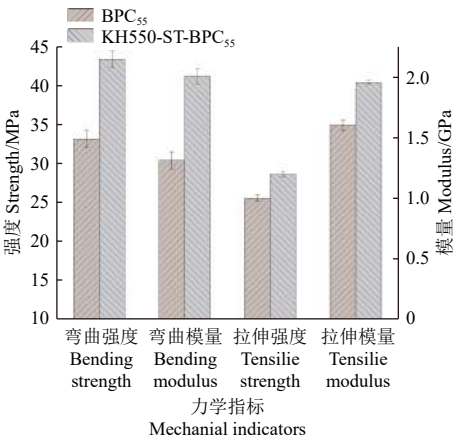


图 3 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的弯曲和拉伸性能对比图  
Fig.3 Bending and tensile properties of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub>

2.2.2 扫描电镜分析

BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> SEM 如图 4 所示。未经纳米改性的 BPC<sub>55</sub> 界面分散明显，竹纤维与 HDPE 界面结合处存在大量间隙，两者的相容性较差。经纳米改性之后的 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 界面更平整，内部间隙明显减少，纳米颗粒可以有效填充空隙并均匀分布于复合材料中，减少了材料成分间的相互作用。KH550 与纳米 SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub>

表面形成了共价键,产生的空间阻力阻止了颗粒团聚,进而提升 BPC 材料力学性能<sup>[41]</sup>。

### 2.2.3 耐光老化性分析

BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 经过不同紫外老化时间后的表面形貌如图 5 所示,可见未进行 KH550-ST 改性的 BPC<sub>55</sub> 颜色退化现象较为明显,这是由于紫外线引起了聚合物链断裂和氧化反应导致的颜色变化。经 KH550-ST 改性后的 BPC<sub>55</sub> 在老化初期因纳米 SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> 颗粒的白色属性而略显灰白,但经过 1 200 h 的紫外线照射后,颜色并未有明显的退化,显示出较好的颜色稳定性。

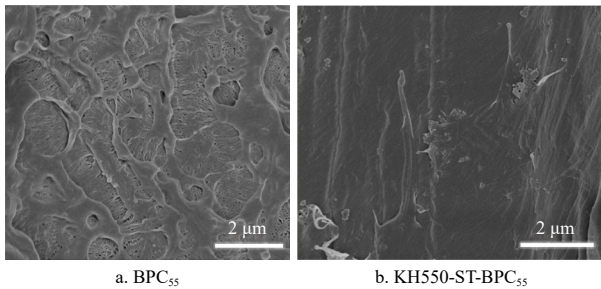


图 4 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 扫描电镜图  
Fig.4 SEM images of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub>

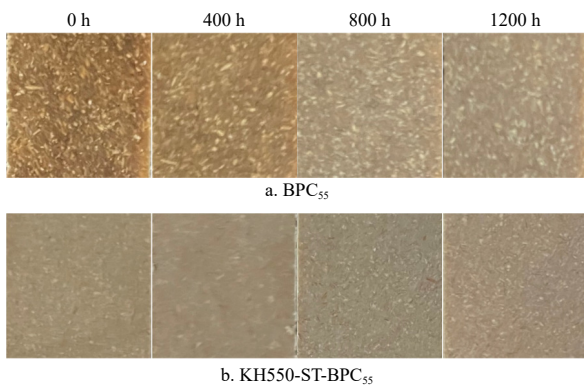


图 5 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的表面形貌随光紫外老化时间的变化

Fig.5 Surface morphology of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub> at different UV-aging hours

使用分光测色仪测定经过不同老化时间后, BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的颜色变化如图 6 所示,可见随着老化时间增加,样品均出现颜色值变化。BPC<sub>55</sub> 在明暗度,红绿色,以及黄蓝色的测定中变幅较大; KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 在整个老化周期内颜色保持相对稳定,其  $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$  和  $\Delta b^*$  值也均小于 BPC<sub>55</sub>。经过 1 200 h 的紫外老化后, BPC<sub>55</sub> 样品  $\Delta E^*$  增加较大, KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 样品  $\Delta E^*$  增加较小,表明改性材料在紫外线老化过程中颜色更稳定,且耐光老化性能提升 77.79%。BPC 颜色的变化主要是由于纤维素、半纤维素和木质素发生光化学反应<sup>[42-43]</sup>,加入纳米 SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> 提高材料抗 UV 辐射的能力,是因为 TiO<sub>2</sub> 可以吸收紫外线并转化为热能或其他形式的能量释放出去,从而减少了对 BPC 中天然成分的直接损害;同时, SiO<sub>2</sub> 包覆 TiO<sub>2</sub> 粒子,有助于分散和稳定 TiO<sub>2</sub>,进一步提高其光稳定性,从而减少光化学反应的发生,保

护了材料不受光降解的影响,延长材料的使用寿命和保持其原有颜色<sup>[24-25]</sup>。因此通过光老化试验结果来看,通过 KH550-ST 改性 BPC 可有效抵抗紫外线老化,提升竹塑复合材料的耐光稳定性和抗氧化性能。

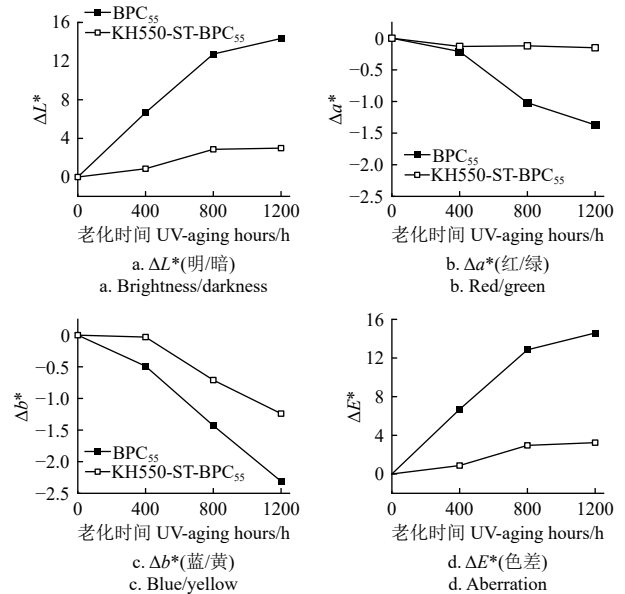


图 6 不同紫外老化时间 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的比色分析

Fig.6 Colorimetric analysis of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub> at different UV-aging hours

### 3 纳米增强竹塑一体式托盘仿真分析

目前应用有限元仿真方法针对金属质、木质和塑料托盘堆码和叉举工况下进行应力变形分析较为常见,也较为有效<sup>[44-46]</sup>。主要是进行不同荷载和应力条件下的变形和失效状态进行模拟,并通过少量的实验进行结果验证。针对层积材,储德淼等<sup>[47]</sup>应用有限元仿真进行了静载荷下的应力云图、变形云图的仿真,确定了易产生破坏的位置,与实验测试结果一致,证明了有限元仿真的有效性。最新, Ai 等<sup>[48]</sup>应用有限元仿真方法确定了不同湿冷条件下的木质托盘铺板的易损程度,并通过实验确认了损伤判定与仿真结果一致。由于国标托盘尺寸较大,难于进行力学实验。因此参照现有研究,本文应用有限元方法进行了纳米增强后竹塑一体式托盘的仿真分析。

#### 3.1 一体式托盘仿真

本研究参照现有木塑托盘结构,按照 GB/T 2934-2007<sup>[49]</sup>,设计一体式竹塑复合托盘并应用 Creo7.0 软件建立托盘模型(图 7a)。托盘尺寸为 1 200 mm×1 000 mm×175 mm,由 9 条顶铺板、9 条底铺板、9 个垫块、3 条上衍板和 3 条下衍板组成,可四向进叉、双面使用。根据 GB/T 4995-2014<sup>[50]</sup>,以及本研究试验获得的改性前后的 BPC<sub>55</sub> 材料的力学参数(表 2),进行 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 材料托盘在额定荷载和极限荷载下进行堆码刚度和强度仿真测试。

托盘刚度反映其在额定负载下抵抗变形的能力,强度为承受负荷而不破坏的能力。当托盘额定负载能力设



定为 1 000 kg（即在刚度仿真中对托盘顶部施加 9800N 的压力），强度仿真采用极限负载即额定负载的 2 倍 19 600 N。施加载荷力的位置及方向如图 7b 所示。为防止托盘在压力加载过程中产生横向运动，将托盘底铺板设定为固定约束（图 7c）。

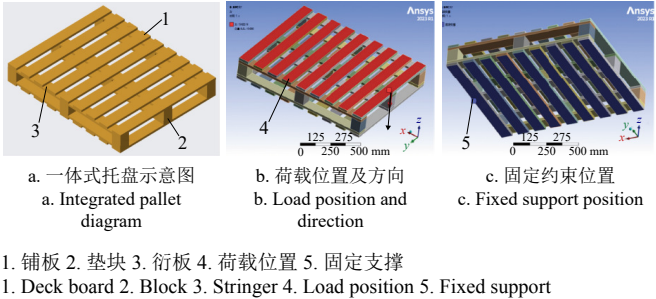


图 7 一体式托盘模型建立  
Fig.7 Establishment of an integrated pallet model

表 2 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 材料力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub>

样品 Samples	密度 Density /(kg·m <sup>-3</sup> )	弯曲模量 Bending modulus /GPa	泊松比 Poisson ratio
BPC <sub>55</sub>	1 160.19	1.32	0.420
KH550-ST-BPC <sub>55</sub>	1 099.01	2.01	0.385

3.2 仿真结果与分析

图 8 为两种荷载条件下的变形云图，顶铺板从左向右依次为第 1 条铺板到第 9 条铺板，标注区域为托盘最易变形受损位置。

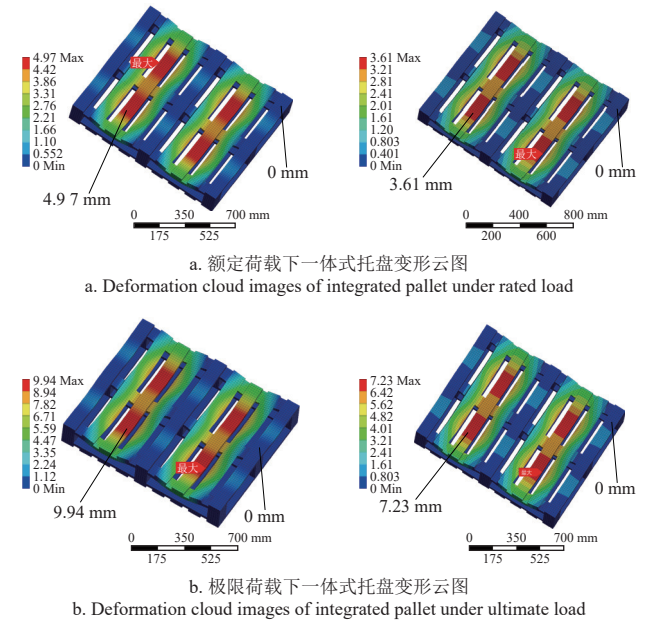


图 8 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 一体式托盘有限元仿真变形云图  
Fig.8 Deformation cloud images of finite element simulation for integrated pallets of BPC<sub>55</sub> and KH550-ST-BPC<sub>55</sub>

从中可见，当托盘用于货物堆码工况时，顶铺板向下产生变形，变形区域主要集中在第 2、3、4、6、7、8 条铺板上，其中第 3、7 条铺板变形最为严重。原因在于铺板横跨垫块中间，下方没有支撑物且距离两侧垫块最

远，堆码受力时无法得到足够的支撑力。因此，3、7 铺板变形程度明显高于其他铺板。

由图 8a 可见，BPC<sub>55</sub> 托盘与 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘的最大变形量分别为 4.97 mm 和 3.61 mm，均远低于国标规定的 21.90 mm，改性后 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 变形量降低了 27.36%。改性前后托盘在堆码过程中变形趋势与抗弯试验结果趋势一致，这表明 KH550-ST 改性的 BPC<sub>55</sub> 竹塑复合材料托盘在日常堆码应用中，相对于改性前具有更强的抵御变形的能力。

图 8b 为极限荷载（19600N）下 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘变形云图，可见托盘变形趋势与刚度仿真试验的结果一致，但在极限荷载的作用下，变形量增加，易受损趋势更高。BPC<sub>55</sub> 托盘与 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘最大变形量分别为 9.44 mm 和 7.23 mm，均符合国标规定，但改性后托盘的变形量降低了 23.41%。这说明 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘，表现出更低的挠度变化，承载压力能力更强，在实际应用中可负荷的货物量更大。

3.3 托盘轻质化结构设计

根据 BPC<sub>55</sub> 和 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 的制作材料的单位质量，优化前托盘体积为 5.098 95×10<sup>4</sup> cm<sup>3</sup>，可计算获得 BPC<sub>55</sub> 的托盘质重为 59.12 kg，而相同体积下的 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘质重约为 56.04 kg，重量有所下降。对此再进行轻质化托盘结构设计，如下。

KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘轻质优化区域和排除区域如图 9 所示，其中标签 B 被标签 A 覆盖，在标签 A 下方。以减轻体积为优化目标，在保证铺板基本长宽下将优化设计区域设定为 9 条顶铺板与 3 条上桁板。在 9 条顶铺板中添加位移约束，约束值设为国家平托盘堆码变形最大范围 21.9 mm，以保证优化后一体式托盘结构在堆码过程满足国标。结合实际模型，设计新优化托盘铺板与桁板，计算可得，每条铺板体积减少了约 205 cm<sup>3</sup>，每条桁板体积约减少 311 cm<sup>3</sup>。在不改变原有铺板的长度和宽度尺寸下，对桁板进行镂空式设计，对铺板底面部分区域进行整齐化剔除。在极限荷载压力下，KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘仿真变形量由 7.23 mm 降低至 3.93 mm，降低约 45.64%，在规定标准范围内；屈服强度满足国标，并保证了托盘堆码性能。经计算，轻质优化后的 KH550-ST-BPC<sub>55</sub> 托盘体积 4.545 59×10<sup>4</sup> cm<sup>3</sup>，下降 10.85%，质重下降 10.87%。达到减轻体积的优化目标。托盘质量的降低意味着可以使用更少的原材料，在运输过程中降低能源排放；减轻自重利于减少运输成本，提高托盘运输效率和有效载荷。

目前竹粉的单位价格约为 HDPE 的 1/6，因此在相同质量情况下，竹粉含量每增加一个单位，竹塑复合材料托盘的成本约降低约 16.7%。我国竹材采伐和加工剩余物储量巨大，如可将竹材加工剩余物用于竹塑复合材料的制备和生产中，不仅可降低托盘原材料成本，更为解决竹资源浪费问题提供了一种可行的解决途径。经初步核算，按照本研究改性方法的用量和比例，纳米改性

所用  $\text{SiO}_2$  颗粒、 $\text{TiO}_2$  颗粒、无水乙醇以及其他改性助剂等占总材料单位成本约 2~4% (参考现有市场价格), 即改性后的材料购买成本需要提高不超过 5%, 远低于结构优化后托盘质量下降比例 (10.87%)。因此, 不考虑生产工艺成本的情况下, 材料改性和优化后的托盘的材料总成本有所节约。尽管如此, 由于无水乙醇在工业化应用比较困难, 该研究中竹塑复合材料制托盘的生产和推广尚存在一定的局限性<sup>[51-52]</sup>。因此, 在不降低纳米  $\text{SiO}_2@/\text{TiO}_2$  增强 BPC 性能的前提下, 探索无水乙醇的替代品将是今后一个重要的努力方向。

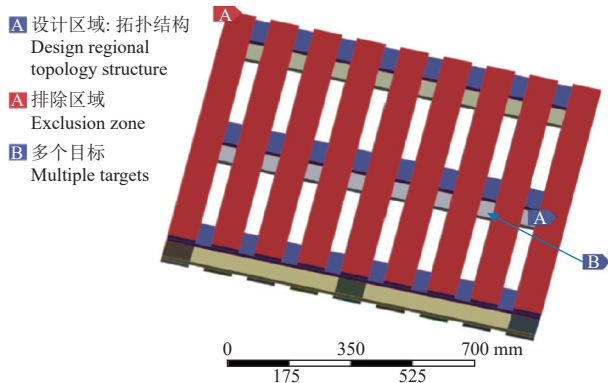


图 9 托盘轻质优化区域和排除区域

Fig.9 Pallet lightweight optimized and excluded areas

## 4 结 论

1) 竹塑复合材料的力学性能测试随着竹粉含量的增加而增加。在竹粉含量为 50% 时,  $\text{BPC}_{55}$  的弯曲强度和弯曲模量高于  $\text{BPC}_{37}$  38.34% 和 62.19%, 拉伸强度和模量分别提高 14.95% 和 101.18%。即在竹粉与 HDPE 配比为 5:5 时所制备的 BPC 表现的力学性能最优。

2) 通过表面形貌的观察,  $\text{BPC}_{37}$  断面存在明显的空隙和孔洞,  $\text{BPC}_{46}$  竹纤维在基体中的分布较均匀, 竹纤维与 HDPE 基体结合较紧密, 但仍存在空洞和间隙,  $\text{BPC}_{55}$  的界面结构更为平整, 纤维分布更均匀。

3) 通过硅烷偶联剂改性纳米  $\text{SiO}_2@/\text{TiO}_2$  (KH550-ST) 后对  $\text{BPC}_{55}$  改性后的竹塑复合材料的力学性能显著增强。相对于改性前的  $\text{BPC}_{55}$ , KH550-ST- $\text{BPC}_{55}$  的弯曲强度和模量分别提高 31.11% 和 52.27%, 拉伸强度和模量分别提高 11.86% 和 21.92%; 经 KH550-ST 改性后的  $\text{BPC}_{55}$  色差变化值 ( $\Delta E^*$ ) 比改性前  $\text{BPC}_{55}$  小, 表明耐光老化性得到显著提升。该研究以期为纳米  $\text{SiO}_2@/\text{TiO}_2$  增强竹塑复合材料在物流周转单元的应用提供理论依据。

### 【参 考 文 献】

[1] 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 Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(15): 234-240. (in Chinese with English abstract)

[2] 张国梁, 沈明哲, 胡继文, 等. 木质重组材单板卷曲辊压成型平台设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 271-281.  
ZHANG Guoliang, SHEN Mingzhe, HU Jiwen, et al. Design and experimental of veneer curling roll forming platform for wooden scrimber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(11): 271-281. (in Chinese with English abstract)

[3] 国务院办公厅关于印发“十四五”现代物流发展规划的通知[Z]. (2024-06-20).

[4] 孙熙军, 王芮. 托盘市场 2023 年回顾和 2024 年展望[J]. 物流技术与应用, 2024, 29(4): 60-65.  
SUN Xijun, WANG Rui. Pallets market review in 2023 and outlook in 2024[J]. Logistics & Material Handling, 2024, 29(4): 60-65. (in Chinese with English abstract)

[5] LIU J, FENG M, ZHANG X, et al. Damage identification and failure characterization of plywood based on AE-BP Model[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2024: 1-21.

[6] 顾春, 黄娴, 孙超, 等. “以竹代塑”潜力大[N]. 人民日报, [2023-01-13].

[7] 陈良宇, 徐树英, 李英教, 等. 木质素基水性聚氨酯/聚乙烯醇共混膜制备及性能[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 202-210.  
CHEN Liangyu, XU Shuying, LI Yingjiao, et al. Preparing lignin-based membrane with waterborne polyurethane/polyvinyl alcohol blend[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 202-210. (in Chinese with English abstract)

[8] SONG W, ZHAO F, YU X, et al. Interfacial characterization and optimal preparation of novel bamboo plastic composite engineering materials[J]. BioResources, 2015, 10(3): 5049-5070.

[9] 薛一帆, 韩晨阳, 倪忠进, 等. 竹粉含量及改性对聚乳酸基竹塑复合材料性能的影响[J]. 竹子学报, 2020, 39(3): 58-66.  
XUE Yifan, HAN Chenyang, NI Zhongjin, et al. Effects of bamboo powder content and modification on the properties of polylacticacid-based bamboo-plastic composites[J]. Journal of Bamboo Research, 2020, 39(3): 58-66. (in Chinese with English abstract)

[10] JIN S, XIONG L, YU Y, et al. Structural design of a hyperbranched chitosan-based bioplastic with excellent strength, antibacterial, and UV shielding performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144687.

[11] LIU S, LIU L, YANG K, et al. Reinforcing the mechanical properties of bamboo fiber/low density polyethylene composites with modified bamboo-woven structure[J]. Journal of Materials Science, 2023, 25(58): 10359-10369.

- [12] LI W, HE X, ZUO Y, et al. Study on the compatible interface of bamboo fiber/polylactic acid composites by in-situ solid phase grafting[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141(8130): 325-332.
- [13] XIAN Y, LI H, WANG C, et al. Effect of white mud as a second filler on the mechanical and thermal properties of bamboo residue fiber/polyethylene composites[J]. *BioResources*, 2015, 10(3): 4263-4276.
- [14] ZHANG W P, LU Y H, KHANAL S, et al. Effects of compatibilizers on selected properties of HDPE composites highly filled with bamboo flour[J]. *Wood and Fiber Science*, 2018, 50(3): 254-264.
- [15] 周高飞, 张凯强, 冯永国, 等. 植物纤维表面改性增强环氧树脂复合材料研究进展[J]. *材料导报*, 2024, 38(S1): 570-574.  
ZHOU Gaofei, ZHANG Kaiqiang, FENG Yongguo, et al. Research progress of epoxy resin composites reinforced by plant fiber surface modification[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(S1): 570-574. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马志远, 关明杰. 偶联剂处理对碳纤维/竹展平板复合材料界面结合强度的影响[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 419-427.  
MA Zhiyuan, GUAN Mingjie. Effect of coupling agent treatment on interfacial bonding strength of carbon fiber/flattened bamboo composite[J]. *Journal of Composite Materials*, 2023, 40(1): 419-427. (in Chinese with English abstract)
- [17] REALE D, DRZAL T. Surface modification of bamboo fiber with sodium hydroxide and graphene oxide in epoxy composites[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(3): 1135-1147.
- [18] 徐灿, 陆继倾, 白天, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性竹纤维/乙烯基树脂复合材料界面相容性[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 2768-2778.  
XU Can, LU Jiqing, BAI Tian, et al. Interfacial compatibility of nano-SiO<sub>2</sub>-modified bamboo fiber/vinyl resin composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 38(9): 2768-2778. (in Chinese with English abstract)
- [19] FAROOQ N, KALLEM P, UR REHMAN Z, et al. Recent trends of titania (TiO<sub>2</sub>) based materials: A review on synthetic approaches and potential applications[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2024, 36(6): 103210.
- [20] 许青莲, 黄锐函, 李宣林, 等. 芒果叶提取液生物合成纳米 TiO<sub>2</sub> 工艺优化及其抗菌性能[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 281-289.  
XU Qinglian, HUANG Ruihan, LI Xuanlin, et al. Optimization of the process for biosynthesis nano-TiO<sub>2</sub> from mango leaf extract and its antimicrobial properties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(18): 281-289. (in Chinese with English abstract)
- [21] [21]鲍瑞. 微波煅烧偏钛酸制备金红石型 TiO<sub>2</sub> 研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- BAO Rui. Study on the Preparation of Rutile TiO<sub>2</sub> by Microwave Calcination of Metatitanic Acid[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [22] XIE G, WANG L, ZHU Q, et al. Modification of SiO<sub>2</sub> nanoparticle-decorated TiO<sub>2</sub> nanocomposites with silane coupling agents for enhanced opacity in blue light-curable ink[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(7): 9678-9687.
- [23] FEI P, XIONG H, CAI J, et al. Enhanced the weatherability of bamboo fiber-based outdoor building decoration materials by rutile nano-TiO<sub>2</sub>[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 307-316.
- [24] YANG H, HE P, CHENG H, et al. Preparation of a nano-TiO<sub>2</sub>-loaded antioxidant and its anti-aging performance against UV/O<sub>3</sub> in thermoplastic vulcanizates[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(28): 12516-12524.
- [25] DU B, CHEN F, LUO R, et al. Synthesis and characterization of nano-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-acrylic composite resin[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019(1): 6318623.
- [26] 吴佳敏, 吴燕, 黄琼涛, 等. 硅烷偶联剂改性对透明木材性能的影响[J]. *林产工业*, 2019, 46(8): 22-25, 29.  
WU Jiamin, WU Yan, HUANG Qiongtao, et al. Effect of Silane Coupling Agent Modification on Transparent Wood Properties[J]. *China Forest Products Industry*, 2019, 46(8): 22-25, 29. (in Chinese with English abstract)
- [27] AHANGARAN F, NAVARCHIAN H. Recent advances in chemical surface modification of metal oxide nanoparticles with silane coupling agents: A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 286: 102298.
- [28] 唐英, 李阳, 凌鉴, 等. 木质平托盘抗冲击性能有限元分析及试验研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(13): 124-134.  
TANG Y, LI Yang, LING J, et al. Finite element analysis and experimental study on the performance of resistance to impact of wooden flat pallets[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(13): 124-134. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曹菲. 木托盘受力性能理论分析及有限元模拟[J]. *包装工程*, 2016, 37(23): 50-54.  
CAO Fei. Theoretical analysis and finite element simulation of mechanical property for wooden pallet[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(23): 50-54. (in Chinese with English abstract)
- [30] SHCHELOKOVA E A, TYUKAVKINA V V, TSYRYATYEVA A V, et al. Synthesis and characterization of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283: 122769.
- [31] 李锋, 李逸青, 毛海立, 等. 低共熔溶剂分离油茶果壳木质素及其抗氧化活性和热解特性分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(24): 261-267.  
LI Feng, LI Yiqing, MAO Haili, et al. Antioxidant activity and pyrolysis properties of lignin extracted from camellia oleifera



- shell by deep eutectic solvents (DES)[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 261-267. (in Chinese with English abstract).
- [32] GUO J, CAO M, REN W, et al. Mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles treatment bamboo fiber-reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(22): 12643-12659.
- [33] 塑料 弯曲性能的测定: GB/T 9341-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [34] 塑料 拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [35] 塑料 实验室光源暴露试验方法 第3部分: 荧光紫外灯: GB/T 16422.3-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [36] CHEN Y, LIU C, LIANG Z, et al. Hydrochromic wood biocomposites for humidity and moisture detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142890.
- [37] 贾文婷, 李文琦, 吴洪斌. 不同前处理联合压差闪蒸干燥对红枣脆片品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 116-123.
- JIA Wenting, LI Wenqi, WU Hongbin. Effects of different pretreatments combined with instant controlled pressure drop drying on the quality of jujube slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 116-123. (in Chinese with English abstract).
- [38] 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.
- ZHOU Xiaxing, HONG Guoxin, WANG Mingguang, et al. Properties of bamboo flour/waste polyethylene composites[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(2): 208-213. (in Chinese with English abstract)
- [39] SALAKHOV I I, SHAIDULLIN N M, CHALYKH A E, et al. Low-temperature mechanical properties of high-density and low-density polyethylene and their blends[J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1821.
- [40] WU Y, MA J, LIU C, et al. Surface modification design for improving the strength and water vapor permeability of waterborne polymer/SiO<sub>2</sub> composites: Molecular simulation and experimental analyses[J]. *Polymers*, 2020, 12(1): 170.
- [41] VERMA K, SIDDIKI S H, MAITY C K, et al. Development of reduced graphene oxide (rGO) reinforced poly (lactic) acid/cellulose nanocrystal composite through melt mixing: Effect of nanofiller on thermal, structural, biodegradation and antibacterial properties[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204: 117307.
- [42] XU J, LIN P, LONG L, et al. Aging performance of nano - ZnO modified polyurethane - acrylic UV ink composites on wood and the degradation mechanism[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(9): 3533-3540.
- [43] SONG W, ZHANG S, FEI B, et al. Mussel-inspired polydopamine modification of bamboo flour for superior interfacial compatibility of bamboo plastic composites: Influence of oxidant type[J]. *Cellulose*, 2021, 28: 8567-8580.
- [44] ZACCHEI E, ESTEVES M, AZEVEDO A, et al. Analytical modelling and experimental assessment of metal pallets. Mechanical behaviour and durability performance under microbiological, chemical and environmental attacks[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02735.
- [45] 唐英, 毛讯辉, 孙汝. 木托盘 RFID 标签安装方式有限元分析及试验研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(7): 166-174.
- TANG Ying, MAO Xunhui, SUN Ru. Finite element analysis and experimental research on installation methods of RFID tags on wooden pallets[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(7): 166-174. (in Chinese with English abstract)
- [46] 叶星辉, 梁正华, 赖尚涛. 内置钢管式塑料托盘注塑模具设计及承重仿真分析[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3): 103-111.
- YE Xinghui, LIANG Zhenghua, LAI Shangtao. Design and load-bearing simulation analysis of injection mould for built-in steel pipe plastic tray[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3): 103-111. (in Chinese with English abstract)
- [47] 储德淼, 母军, 康柳, 等. 单板层积材的三维光学检测及其托盘的有限元仿真分析[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(9): 147-155.
- CHU Demiao, MU Jun, KANG Liu, et al. Three-dimensional optical deformation measurement of laminated veneer lumber and the finite element simulation analysis of the pallets[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(9): 147-155. (in Chinese with English abstract)
- [48] Ai M, Gao G, Zhao Z, et al. Experimental study on fracture failure characteristics evaluation of wooden pallets in humid-cold environment based on piezoelectric technology[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119627.
- [49] 联运通用平托盘 主要尺寸和公差: GB/T 2934-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [50] 联运通用平托盘 性能要求和试验选择: GB/T 4995-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [51] 王辉, 吴志连, 郇志军, 等. 合成气经二甲醚羰基化及乙酸甲酯加氢制无水乙醇的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(10): 4497-4503.
- WANG Hui, WU Zhilian, TAI Zhijun, et al. Advances in synthesis of anhydrous ethanol from syngas via carbonylation of dimethyl ether and hydrogenation of methyl acetate[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(10): 4497-4503. (in Chinese with English abstract)
- [52] 周俊伟, 张雷, 郭林樵. 双效萃取精馏工艺制备无水乙醇的模拟与优化[J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 221-225.
- ZHOU Junwei, ZHANG Lei, GUO Linqiao. Simulation and optimization of double-effect extractive distillation process for preparation of absolute ethanol[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(7): 221-225. (in Chinese with English abstract)

## Preparation of nano- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ reinforced bamboo-plastic composites and simulation analysis of performance for pallet application

NIU Yimi , DU Xinyu , YU Mengyan , HONG Weiqi , GAO Shan<sup>\*</sup>

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Biomass composites are ever-increasing in agricultural engineering. This study aims to enhance the mechanical properties and aging resistance of bamboo-plastic composites (BPC), in order to realize the environmental friendliness and application of its pallet products. Firstly, three ratios of bamboo fiber (BF) and high-density polyethylene (HDPE) were used to prepare the BPC. Then mechanical property tests were conducted to determine the optimal ratio of BF to HDPE. Among them, nano- $\text{TiO}_2$  was widely used to enhance the performance of plant fiber/thermoplastic polymer composites, due to its chemical inertness, anti-aging, anti-bacterial properties, and non-toxic nature. An organic-inorganic co-modification was also employed to enhance the BPC properties for strong compatibility with bamboo fiber and plastic matrix. Nano- $\text{SiO}_2$  was coated onto nano- $\text{TiO}_2$  to prepare  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  nanoparticles for the high dispersion and aging resistance of  $\text{TiO}_2$ . Nano- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  modified BPC (KH550-ST-BPC) was prepared using the silane coupling agent KH550 as a reinforcing agent by a spray coating. The properties were evaluated to compare the mechanical properties, SEM images, and UV aging properties of BPC before and after modification. In addition, ANSYS Workbench software was used to perform the finite element analysis of BPC integrated pallets before and after modification, in order to verify the application performance of reinforced BPC pallets. The results indicated: 1) The bending and tensile properties of BPC shared an increasing trend with the increase of bamboo fiber content. The optimal mechanical properties of BPC were obtained at a 5:5 mass ratio of BF to HDPE, with a 38.34% increase in the bending strength and a 62.19% increase in the bending modulus, compared with the 3:7 ratio. The tensile strength and modulus increased by 14.95% and 101.18%, respectively. SEM images revealed that there was a smoother interface for BPC55, which was better consistent with the mechanical test. 2) The bending and tensile strength of BPC were enhanced by 31.11% and 11.86%, respectively, in the modified nano KH550- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ , while the bending and tensile modulus were enhanced by 52.27% and 21.92%, respectively. The interfacial gaps of modified BPC were significantly reduced in the SEM images, indicating the strong bonding between the bamboo fibers and HDPE. The KH550- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  was introduced to fill the interface gaps for the BPC compatibility, which was better consistent with the mechanical property test. 3) The surface morphology revealed that KH550- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  modified BPC maintained better color stability for the high resistance to UV aging. While the unmodified BPC showed significant color fading after 1 200 h UV irradiation aging. Colorimetric analysis confirmed that the color stability of KH550-ST-BPC was significantly better during UV aging, with a color aberration change value 77.79% lower than before. 4) Finite element analysis indicated that the modified BPC pallet exhibited the better-bending properties and load-bearing capacity, with a 27.36% reduction in the maximum deformation under the rated load and a 23.41% reduction under the ultimate load in stacking simulation. These research findings can provide a strong reference for the application of nano- $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  reinforced BPC as logistics turnover units.

**Keywords:** mechanical properties; composite materials; finite element simulation; Turnover pallet