

# 改性竹纤维增强回收聚苯乙烯复合材料的制备及性能

马诗贺, 张臻, 袁圆, 黄炜凌, 刘洋, 贺国文\*

湖南城市学院材料与化学工程学院, 低碳与环境功能材料湖南省高校重点实验室, 湖南 益阳

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年4月11日; 发布日期: 2026年4月21日

## 摘要

聚苯乙烯作为一种使用广泛但难降解的热塑性材料, 其回收利用面临着界面性能差、力学性能弱等问题。本文旨在通过改性竹纤维来增强回收聚苯乙烯的力学性能, 为聚苯乙烯的高质化再生利用提供一条可靠途径。本研究采用原子转移自由基聚合(AGET-ATRP)接枝改性与偶联剂改性结合对天然竹纤维表面进行改性。制备了一系列不同竹纤维含量的回收聚苯乙烯复合材料, 对材料进行了相关的表征和力学性能研究。研究表明, 改性竹纤维能够显著提升其与回收聚苯乙烯的界面结合性。与未改性竹纤维相比, 改性竹纤维对回收聚苯乙烯基体复合材料的拉伸强度和弯曲强度均有提升。然而, 竹纤维的添加会导致复合材料抗冲击性能下降。与改性的竹纤维相比, 未改性竹纤维制备的复合材料的抗冲击性能下降更明显。这说明了改性技术可以有效克服天然纤维与非极性基体材料之间的相容性障碍, 展现出良好的增强效果与应用前景。

## 关键词

回收聚苯乙烯, 竹纤维, 接枝改性, 力学性能, 热稳定性

# Preparation and Properties of Recycled Polystyrene Composites Reinforced by Modified Bamboo Fiber

Shihe Ma, Zhen Zhang, Yuan Yuan, Weiling Huang, Yang Liu, Guowen He\*

Key Laboratory of Low Carbon and Environmental Functional Materials of College of Hunan Province, School of Materials and Chemical Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: March 17, 2026; accepted: April 11, 2026; published: April 21, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 马诗贺, 张臻, 袁圆, 黄炜凌, 刘洋, 贺国文. 改性竹纤维增强回收聚苯乙烯复合材料的制备及性能[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 231-240. DOI: 10.12677/ms.2026.164089

## Abstract

Polystyrene, as a widely used but difficult to degrade thermoplastic material, faces problems such as poor interfacial properties and weak mechanical properties in its recycling and reuse. In this study, modified bamboo fibers were used to enhance the mechanical properties of recycled polystyrene, providing a reliable approach for the high-quality regeneration and utilization of polystyrene. The surface modification of natural bamboo fibers is achieved through a combination of AGET-ATRP graft modification and coupling agent modification. A series of recycled polystyrene composites with different bamboo fiber contents were prepared, and the materials were characterized and their mechanical properties were studied. The research results indicate that modified bamboo fiber can significantly enhance its interfacial bonding with recycled polystyrene. Compared with the composite material prepared by unmodified bamboo fiber, modified bamboo fiber improves the tensile strength and bending strength of recycled polystyrene matrix composite material. However, the addition of bamboo fiber can lead to a decrease in the impact resistance of composite materials. Compared with the composite material prepared by modified bamboo fiber, the impact resistance of the composite material prepared by unmodified bamboo fiber decreased more significantly. This indicates that modification technology can effectively overcome the compatibility barriers between natural fibers and non-polar matrix materials, demonstrating good reinforcement effects and application prospects.

## Keywords

Recycled Polystyrene, Bamboo Fiber, Graft Modification, Mechanical Property, Thermal Stability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前沿

聚苯乙烯(PS)作为一种良好机械性能、电绝缘性能以及加工成型性的热塑性树脂,在包装、建筑以及电子等领域获得广泛应用。然而,聚苯乙烯不易自然降解,造成严重的白色污染,给生活环境以及城市管理带来巨大压力。废旧聚苯乙烯的回收利用成为材料循环利用领域急需解决的关键问题。拥有可再生、可生物降解及力学性能优异的天然纤维,正逐步成为复合材料研究的一个要点[1]。其中竹纤维依靠其成本低、来源广及强度高优势,在众多天然纤维当中表现十分突出,其在改善热塑性塑料力学性能等方面拥有广阔前景[2]。然而因为天然纤维与聚合物基体在制备复合材料中存在界面相容性欠佳的问题,限制了天然纤维提高效果的充分发挥。对此,有学者运用接枝马来酸酐、硅烷偶联剂处理等方式对天然纤维进行改性,以提高其与基体的界面粘结力[3]。当下有关天然纤维提高热塑性聚合物力学性能[4]-[7]的研究颇为丰富,在聚丙烯[8][9]、聚乳酸[10]-[12]等基体中存在大量应用实例,在改性废旧高分子材料中有一定的研究[13][14]。然而针对回收聚苯乙烯与天然纤维的界面改性以及提高性能的研究依旧比较少见,在以接枝改性竹纤维作为增强相、回收聚苯乙烯作为基体材料的复合材料体系方面仍在探索。开展此类复合材料的性能优化研究,对废旧塑料的高质化再生利用具有积极的现实意义。本文通过对竹纤维进行表面化学改性,研究其在回收聚苯乙烯复合材料中的增强效果,为资源回收与环境友好型材料的应用提供新的思路。

## 2. 实验部分

### 2.1. 实验原料及主要药品试剂

回收聚苯乙烯,片状,由湖南新基源新材料科技有限公司提供;竹纤维(BF),湖南桃江某竹材公司提供;N,N-二甲基甲酰胺(DMF),AR,上海晶纯试剂;三乙胺、抗坏血酸(VC),均为AR,天津科密欧化学试剂;4-二甲基氨基吡啶,99%,上海晶纯试剂;五甲基二乙烯基三胺(PMDETA),99%,上海晶纯试剂;溴化铜,AR,上海晶纯试剂;异戊二烯(ISO),CP,上海晶纯试剂;2-溴异丁酰溴(BIBB),98%,上海晶纯试剂;邻苯二甲酸二辛酯(DOP),酯含量 $\geq 99.0\%$ ,用作增塑剂,蚌埠宇顺化工;丙酮、乙醇、醋酸、四氢呋喃,均为AR,上海麦克林生化科技;偶联剂(KH-570),98%,上海麦克林生化科技。

### 2.2. 主要仪器设备

扫描电镜,JSM-5610LV,日本电子光学实验室;真空干燥箱,DZF-6210,上海新苗医疗器材制造;傅里叶变换红外光谱,NICOLET5700,赛默飞世尔科技;注塑机,KD-1080,宁波市金星塑料机械;双螺杆挤出机,SHJ-20,南京杰恩特机电;电子式万能试验机,CMT-6105,珠海三思试验设备;组合冲击试验机,XJJUD-50,承德市大加仪器;三点弯曲材料试验机,HS-3001A-S,上海和晟仪器科技。

### 2.3. AGET-ATRP 接枝改性竹纤维

#### 2.3.1. 竹纤维大分子引发剂的制备

竹纤维在接枝单体聚合物前,需通过引发剂卤烷与竹纤维的羟基进行酰化、酯化,将引发剂引入竹纤维中,得到竹纤维大分子引发剂,大分子引发剂的制备见图1。

首先,将10g竹纤维(BF)用四氢呋喃和丙酮润洗30min后抽滤。由于水对酯化反应有一定的影响,因此润洗及真空抽滤法主要是将纤维中的水等杂质除去。然后,在1000ml三颈圆底烧瓶中添加5g4-二甲基氨基吡啶,并将500ml的四氢呋喃缓慢地注入后再添加15ml三乙胺,将抽滤好的竹纤维放在圆底烧瓶中搅拌均匀。在水浴的条件下,向烧杯中添加10ml引发剂2-溴异丁酰溴(BIBB),最后封闭容器,60℃下搅拌反应24h。最后,用无水酒精对反应产物进行润洗,抽滤,烘干得到接枝产品BF-BIBB。

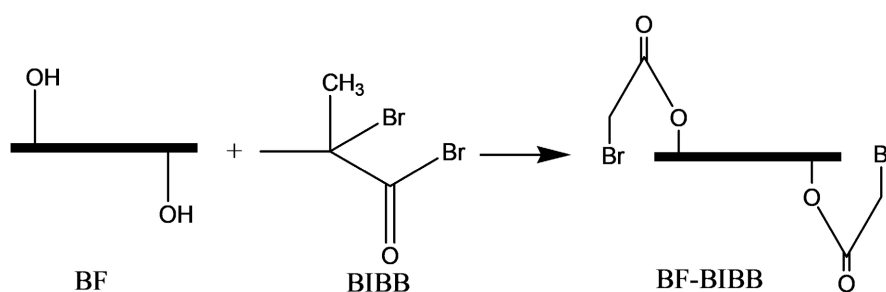


Figure 1. The preparation principle of macromolecular initiators

图1. 大分子引发剂的制备流程

#### 2.3.2. 异戊二烯单体通过 AGET-ATRP 接枝改性竹纤维

本研究选用异戊二烯作为接枝单体,反应机理见图2。向1000ml三颈圆底烧瓶中添加100mlDMF、1.2mlPMDETA、0.55gVC、10gISO,将已制得的竹纤维大分子引发剂置入圆底烧瓶,封口,30℃下搅拌反应6h。最后用去离子水、无水乙醇和丙酮溶液对产品进行润洗,将残余的催化剂和别的杂质去除掉,抽滤,滤渣60℃真空干燥24h得到改性产品BF-B-I。

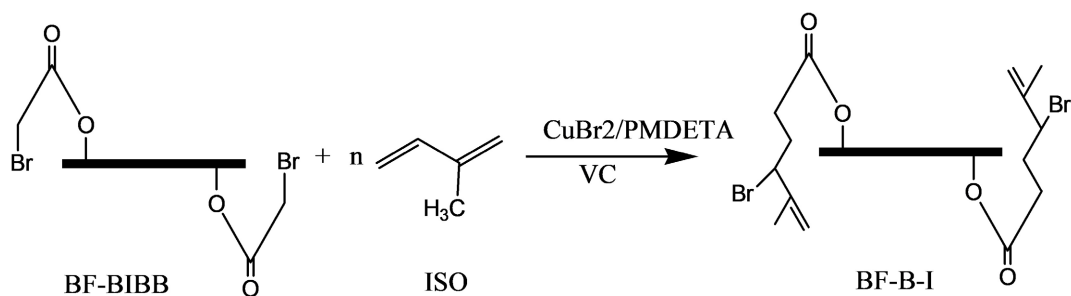


Figure 2. AEGT-ATRP graft polymerization of isoprene  
图 2. 异戊二烯的 AEGT-ATRP 接枝聚合

## 2.4. KH-570 硅烷偶联剂改性竹纤维

将接枝改性的竹纤维(BF-B-I)加入含偶联剂 KH-570 的乙醇/水混合溶液中(v/v, 95:5), 使用醋酸缓冲, 将 pH 调节至 4~5。控制 KH-570 添加量为纤维质量的 5 wt%, 在 60℃ 恒温水浴中反应 4 h。反应结束后, 用乙醇洗涤竹纤维 3 次以去除未反应的硅烷, 最后在 60℃ 真空干燥 24 h, 获得改性竹纤维。

## 2.5. 改性前后竹纤维与回收聚苯乙烯复合材料的制备

本实验以聚苯乙烯为基材, 其制作方法简单、工艺成熟、固化温度易于控制、不会产生甲醛等环保问题。此外, 由于其主链端含有苯环, 故其刚性好, 可加工性好。

首先, 将竹纤维、回收聚苯乙烯树脂按照一定的配比(竹纤维的质量分数 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%)粉碎, 过程中加入增塑剂 DOP(控制其与回收聚苯乙烯质量比 4:100), 然后高速混合。再将混合物在 190℃ 搅拌, 时间 8 min, 然后将其置入对应的模具中, 用平板硫化机将其压下, 温度 180℃, 时间 10 min, 压力 5 MPa。为确保试验结果的准确度, 制作 5 份样品, 并对其进行力学性能测定, 求其平均值。

## 2.6. 材料的结构与性能表征

(1) 红外光谱分析: 测试未改性竹纤维、AGET-ATRP 接枝改性竹纤维、KH-570 硅烷偶联剂改性后竹纤维以及复合材料的化学结构。

(2) 扫描电镜分析: 用扫描电镜观察竹纤维改性前后及复合材料断面的微观形貌, 复合材料样条在液氮中脆断, 测试前样品进行喷金处理。

(3) 力学性能测试: 测试不同含量改性前后竹纤维制备的复合材料样品的拉伸性能、弯曲性能以及冲击性能。拉伸性能测定按照 GB/T 6594.2-2025 进行, 拉伸速度 5 mm/min; 弯曲性能测定按照 GB/T 9341-2008 进行, 采用三点弯曲模式, 速度 2 mm/min; 冲击性能测定按照 GB/T 1043.2-2018 进行, 缺口制样, 采用简支梁模式。

## 3. 数据处理与分析

### 3.1. 材料的微观形貌

#### (1) 竹纤维被异戊二烯接枝改性前后的微观形貌

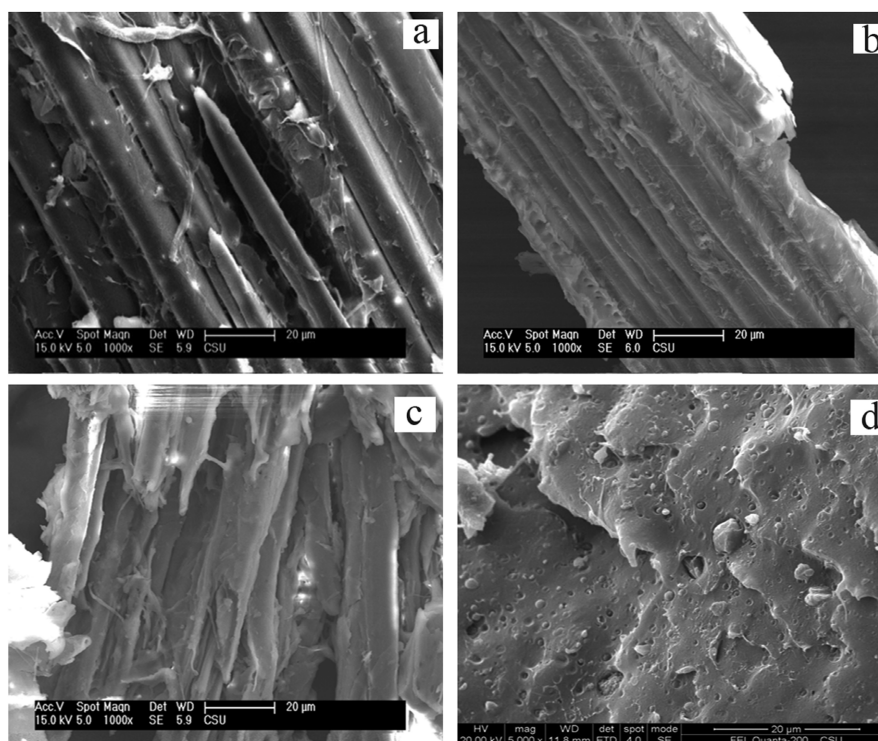
用扫描电镜技术研究了竹纤维的表面形态变化, 从而可以直接判定异戊二烯单体在竹纤维上的接枝情况, 见图 3。图 3(a) 是原竹纤维的表面形态的解析, 易见在改性前, 竹纤维的表面是比较平滑的。图 3(b) 是经异戊二烯接枝改性的竹纤维的表面形态, 易见其表面是粗糙的, 表面被改性物质包裹着, 佐证了异戊二烯在竹纤维上的接枝是成功的。

## (2) 竹纤维被偶联剂 KH-570 改性后的微观形貌

如图 3(c)是竹纤维被偶联剂 KH570 改性后的扫描电镜图,相比原竹纤维和异戊二烯接枝的竹纤维(见图 3(a)、图 3(b)),易见偶联剂改性后的竹纤维拥有着厚实的表面,表面粗糙度明显增加。这表明 KH-570 硅烷偶联剂在竹纤维表面形成了涂层,有助于后续在改性后竹纤维/回收聚苯乙烯复合材料中增强界面结合力和均匀分散性。

## (3) 竹纤维/回收聚苯乙烯复合材料的微观形貌

为保持断面的原有形貌,复合材料样条在液氮中脆断。对含改性竹纤维 5%的复合材料的脆断面进行了 SEM 观察,见图 3(d)。从图可看出,断面较平整,竹纤维在回收聚苯乙烯基体分散均匀,没有出现裸露的纤维状物质,说明竹纤维都被聚苯乙烯包裹良好,二者相容性很好,拥有优良的界面结合力。



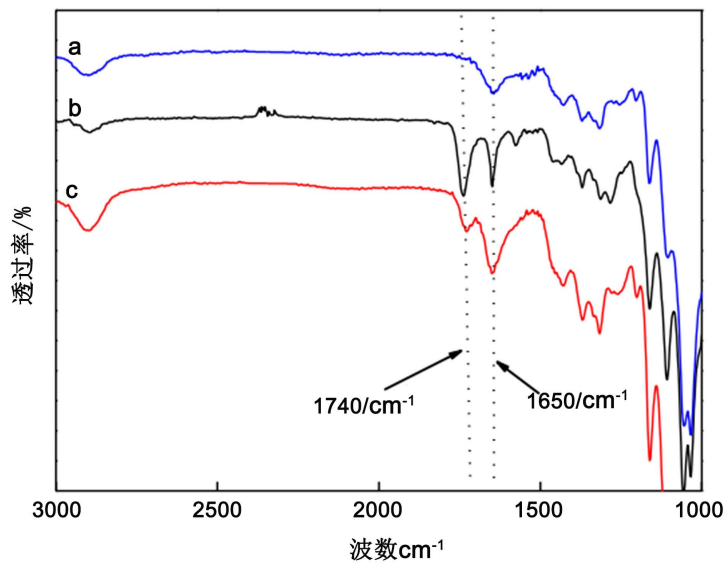
**Figure 3.** SEM images of of BF before and after modification and composite brittle sections (a) is the original bamboo fiber, (b) is the bamboo fiber grafted with isoprene, (c) is the bamboo fiber modified with coupling agent KH570, and (d) is the brittle section of the composite material containing 5% modified bamboo fiber

**图 3.** 改性前后竹纤维及复合材料脆断面的扫描电镜图 (a) 为原竹纤维, (b) 为异戊二烯接枝的竹纤维, (c) 为偶联剂 KH570 改性的竹纤维, (d) 为含 5%改性竹纤维的复合材料脆断面

## 3.2. 改性前后竹纤维的红外光谱分析

### 3.2.1. AGET-ATRP 接枝改性前后竹纤维红外光谱分析

如图 4 所示,由于竹纤维含有较强的羟基,其与树脂类材料的相容性较差,容易发生团聚,需要对其进行表面改性,以减小其表面极性,提高其与树脂类材料的相容性。首先,通过 AGET-ATRP 接枝改性,利用傅里叶红外光谱对其进行表征,并以竹纤维与大分子引发剂为对照,进行对比分析。通过红外光谱可以看到,在  $1740$  和  $1650\text{ cm}^{-1}$  两处,羰基的  $\text{C}=\text{O}$  伸缩,酯基峰收缩减弱,而  $\text{c}$  的峰面积比  $\text{a}$  和  $\text{b}$  要大,收缩幅度也更大,这说明了羰基的降低,  $\text{C}=\text{C}$  双键的增加,说明异戊二烯已被导入大分子链,成功地接枝到了竹纤维上。

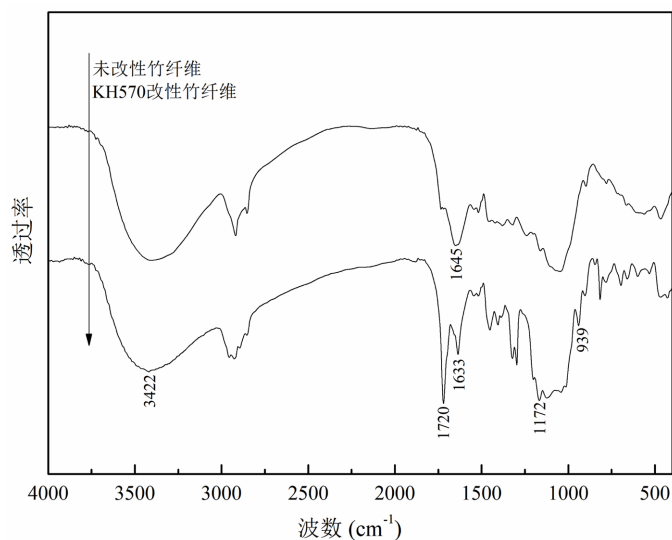


**Figure 4.** Infrared spectra of raw bamboo fiber (a), bamboo fiber macromolecular initiator (b), and AEGT-ATRP graft polymerized bamboo fiber (c)

**图 4.** 原竹纤维(a)、竹纤维大分子引发剂(b)及 AEGT-ATRP 接枝聚合竹纤维(c)的红外光谱图

### 3.2.2. KH-570 硅烷偶联剂改性前后竹纤维红外光谱分析

如图 5 所示, KH-570 改性后竹纤维在  $1720\text{ cm}^{-1}$  处附近出现弱 C=O 伸缩振动吸收峰, 说明少量甲基丙烯酸酯基成功引入。  $1100\sim 1200\text{ cm}^{-1}$  处的 Si-O-C 特征吸收增强, 表明硅烷偶联剂 KH-570 与竹纤维表面羟基发生了缩合反应。



**Figure 5.** Infrared spectra of bamboo fiber before and after modification with coupling agent KH-570

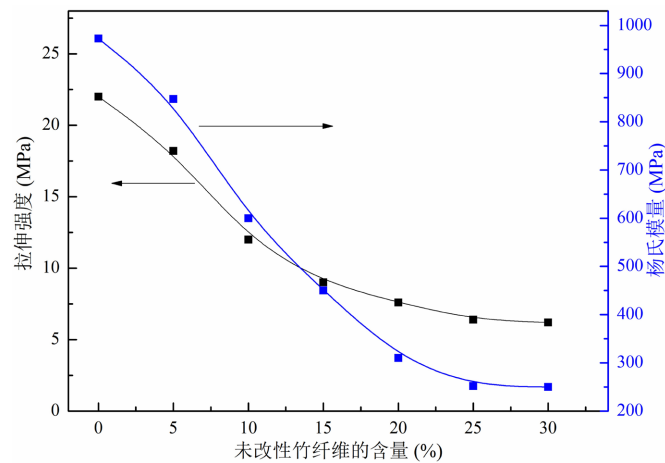
**图 5.** 竹纤维被偶联剂 KH-570 改性前后的红外光谱图

## 3.3. 复合材料的力学性能分析

### 3.3.1. 复合材料的拉伸性能分析

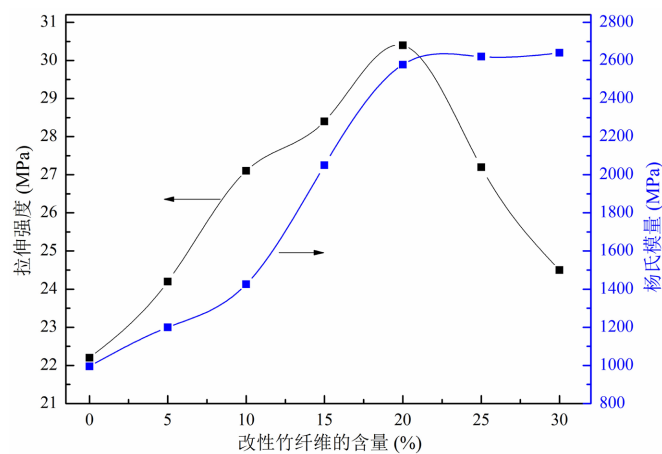
图 6 是未经过改性的竹纤维含量对复合材料的拉伸性能的影响图。从图中可以看出, 随着竹纤维的

持续增加, 材料的拉伸强度以及杨氏模量都不断下降, 这是因为具有刚性的竹纤维材料的加入, 会束缚回收聚苯乙烯基体的分子运动。另外, 竹纤维表面具有很强的极性, 随着添加量的逐步增加, 在基体材料中的团聚现象会越来越严重, 弱边界层也会相应的变多, 这导致缺陷增多, 从而引发应力集中, 导致发生断裂几率增大。



**Figure 6.** Effect of unmodified bamboo fiber content on the tensile strength and Young's modulus of composites  
**图 6.** 未改性竹纤维含量对复合材料拉伸强度及杨氏模量的影响图

图 7 是改性后的竹纤维添加量对复合材料拉伸性能的影响图。可以看出, 随着竹纤维添加量的持续增加, 拉伸强度先增后降, 在竹纤维质量分数为 20% 时拉伸强度达最大(30.45 MPa), 是未改性竹纤维同样含量的复合材料拉伸强度(8.12 MPa)的 3.75 倍, 增强效果非常明显, 主要原因是竹纤维接枝改性后能有效增强其与聚苯乙烯基体的界面结合性。当竹纤维添加量较小时, 竹纤维在回收聚苯乙烯基体中的分散性较好, 改性后两者的结合性好, 能形成一个统一整体, 因此能够使复合材料的拉伸性能得到提高。随着竹纤维添加量的提升, 部分竹纤维发生团聚现象, 在基体中分散不均匀。同时竹纤维含量多了也致使回收聚苯乙烯基体对纤维包覆不完全, 影响两者界面结合, 增加了材料内部缺陷, 降低了复合材料的拉伸强度。复合材料的杨氏模量的变化趋势是先增加后不变, 当改性后竹纤维添加量为 20% 的时候, 模量达到最大且随着添加量的增大而趋于平缓。



**Figure 7.** Effect of modified bamboo fiber content on the tensile strength and Young's modulus of composites  
**图 7.** 改性竹纤维含量对复合材料拉伸强度及杨氏模量的影响图

### 3.3.2. 复合材料的弯曲性能分析

图 8 为未改性竹纤维对复合材料弯曲性能的影响图。由于加入了竹纤维，限制了基体材料的塑性，导致复合材料的抗弯强度和模量不断降低。另外，由于竹纤维表面含有羟基，表现出较强的极性，其含量逐渐增加，导致其在基体中聚集，形成内部缺陷，导致应力集中，导致抗弯强度和模量不断降低。

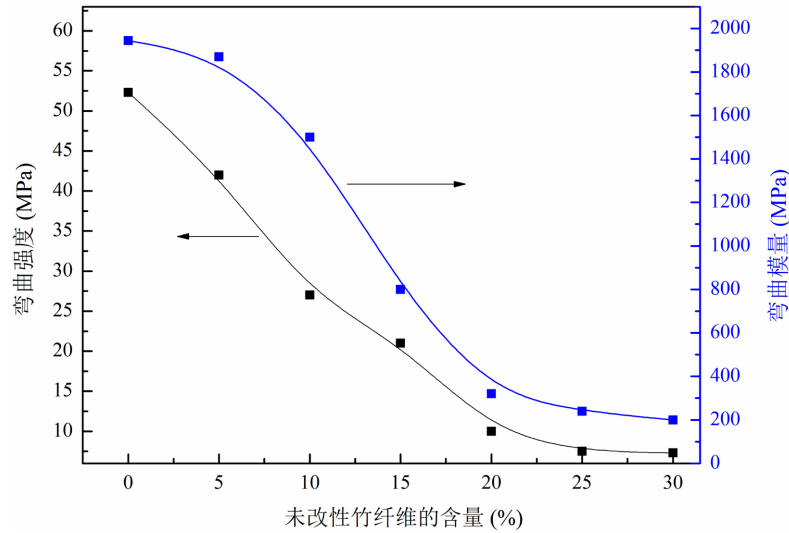


Figure 8. The effect of unmodified BF content on the bending strength and modulus of composites  
图 8. 未改性竹纤维含量对复合材料弯曲强度及模量的影响图

图 9 为改性竹纤维对复合材料弯曲性能的影响图。如图所示，当改性后竹纤维加入量增大时，其抗弯强度呈上升趋势，在 20% 处呈下降趋势，与不加入竹纤维时相比，有所提高。在竹纤维质量分数为 20% 时拉伸强度达最大(79.62 MPa)，是未改性竹纤维同样含量的复合材料拉伸强度(11.70 MPa)的 6.81 倍，增强效果非常明显。另外，竹纤维含量过高会导致基体材料对竹纤维的覆盖不够充分，导致内部缺陷增多，产生应力集中，导致材料的抗弯强度下降。

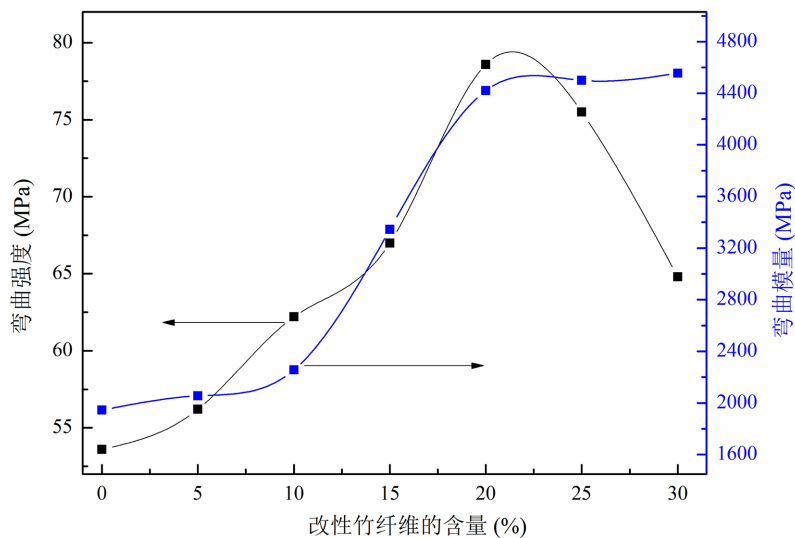


Figure 9. The effect of modified BF content on the bending strength and modulus of composites  
图 9. 改性竹纤维含量对复合材料弯曲强度及模量的影响图

### 3.3.3. 复合材料的抗冲击性能分析

图 10 为竹纤维含量对材料抗冲击性能的影响图。可以看出, 无论竹纤维改性与否, 材料的抗冲击性能随着竹纤维含量的增大而不断降低。复合材料的抗冲击强度不仅取决于基体自身性质, 而且收到分散相及其与基体间的结合强度。主要源于竹纤维本身具有较高的刚性和较难移动性, 阻碍基体分子链的运动, 让复合材料刚性增强, 脆性增大, 韧性会降低。同时, 竹纤维还会导致缺陷和应力集中增多, 使复合材料的抗冲击强度不断降低。另外还发现, 在相同含量时, 改性竹纤维所制备的复合材料的抗冲击性能较未改性的强。如当竹纤维含量为 10% 时, 改性竹纤维制备的复合材料的抗冲击强度( $12.38 \text{ KJ/m}^2$ )是未改性的竹纤维制备复合材料抗冲击强度( $9.25 \text{ KJ/m}^2$ )的 1.34 倍。这样由于竹纤维改性后, 与基体的结合力较未改性的强, 要使材料断裂需要较高的能量。

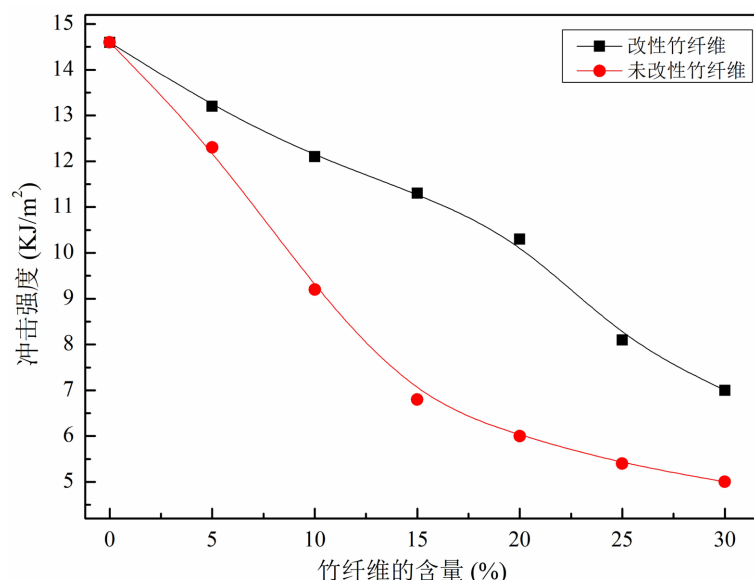


Figure 10. The influence of bamboo fiber content on the impact strength of composites

图 10. 竹纤维含量对复合材料冲击强度的影响图

## 4. 结论

(1) 运用 AGET-ATRP 方法成功达成了异戊二烯在竹纤维表面的定向接枝, 再运用偶联剂 KH-570 来对竹纤维实施改性, 有效地改善了竹纤维与回收聚苯乙烯的界面相容性。

(2) 改性处理的竹纤维对回收聚苯乙烯的拉伸性能和弯曲性能呈现了良好的提高效果。如当竹纤维质量分数 20% 的时候, 拉伸强度达最大( $30.45 \text{ MPa}$ ), 是未改性竹纤维同样含量的复合材料拉伸强度( $8.12 \text{ MPa}$ )的 3.75 倍, 增强效果非常明显。而材料的抗冲击性能随着竹纤维含量增大而下降。

(3) 改性能够有效地提升竹纤维与回收聚苯乙烯的界面结合性, 复合材料脆断面较平整, 竹纤维分散均匀, 改性能够提升竹纤维与基体的界面结合力。

## 基金项目

湖南省大学生创新训练项目(S202311527076), 湖南省自然科学基金区域联合基金项目(2025JJ70380)。

## 参考文献

[1] 张伏, 佟金. 植物纤维及其增强复合材料的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 252-256.

- 
- [2] 徐有明, 胡荣仙, 熊汉国. 竹塑增强复合材料的研究进展及加工现状[J]. 木材工业, 2010, 24(3): 28-31.
- [3] 邓亚峰, 崔若昕, 汪梓玉, 等. 聚合物/生物质复合材料的研究进展[J]. 中国塑料, 2018, 32(7): 10-20.
- [4] 张雨桐, 孙嘉靖, 孟姊成, 等. 固定化漆酶介体系在竹塑复合材料界面改性中的作用机制[J]. 中国人造板, 2024, 31(5): 7-12.
- [5] 张萌, 冯冰涛, 王晓珂, 等. 天然纤维增强热塑性复合材料制备与应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(10): 179-185.
- [6] 曾盛渠, 王琼裕, 阳慧倩, 等. 竹纤维/纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PUR 泡沫制备及其性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9): 55-59, 72.
- [7] 曹诺, 万超, 王玲, 等. 废旧汽车中塑料的高值化回收利用[J]. 环境技术, 2021, 39(3): 221-226.
- [8] 王江凯, 苏梦宇, 孙占英, 等. 聚丙烯/植物纤维复合材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7): 151-155.
- [9] Fu, S.Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C.Y. and Hu, X. (2000) Tensile Properties of Short-Glass-Fiber- and Short-Carbon-Fiber-Reinforced Polypropylene Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **31**, 1117-1125. [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(00\)00068-3](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(00)00068-3)
- [10] 黄茂财, 张效林, 常兴, 等. 不同植物纤维增强 PLA/PBAT/PBS 可降解复合材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6370-6385.
- [11] 余旺旺, 焦艳霞, 周宇涵, 等. 植物纤维/聚乳酸生物质复合材料的制备及应用现状[J]. 塑料, 2020, 49(2): 90-94.
- [12] Huda, M.S., Drzal, L.T., Mohanty, A.K. and Misra, M. (2008) Effect of Fiber Surface-Treatments on the Properties of Laminated Biocomposites from Poly(Lactic Acid) (PLA) and Kenaf Fibers. *Composites Science and Technology*, **68**, 424-432. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.06.022>
- [13] 杨庆永, 阮芳涛, 付应平, 等. 竹纤维/废弃聚乙烯复合材料力学性能研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2022, 34(2): 1-5.
- [14] Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N. and Trada, M. (2011) A Review on the Tensile Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, **42**, 856-873. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>