

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.005

竹质纤维形态对聚乳酸基竹塑复合材料性能的影响

龚新怀^{1,2}, 黄焱焱¹, 葛良望¹, 蔡佳栩¹, 金富露¹, 肖峰¹

(1. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建省竹生态产业协同创新中心, 福建武夷山 354300;

2. 华侨大学材料科学与工程学院, 环境友好功能材料教育部工程研究中心, 福建厦门 361021)

摘要: 为高值化利用竹材加工剩余物资源, 以聚乳酸(PLA)为基体, 竹粉纤维(BF)、竹屑纤维(BS)、竹原纤维(BN)与竹浆纤维(BP)为填料, 采用密炼-注塑工艺制备了四种竹塑复合材料, 研究了竹质纤维种类对其结构与性能的影响。研究结果显示, BP 与 BN 纤维长径比更大, BS 中颗粒形态较多, BF 与 BS 质地较刚硬。BF、BN 与 PLA 共混熔体的混炼扭矩更大, PLA/BP 复合材料吸水率最大。BF、BS、BN 与 PLA 的界面相容性较好, 其添加改善了复合材料的力学性能, 而 BP 添加降低了复合材料的力学性能。与 PLA 相比, 在纤维质量分数为 30% 时, PLA/BF、PLA/BS 与 PLA/BN 复合材料拉伸强度分别提高了 17.85%、13.6%、11.89%, 冲击强度分别提高 24.33%、18.70%、35.57%, 弯曲强度分别提高 19.45%、21.45%、4.99%。PLA/BF 复合材料的综合力学性能最优, 其次为 PLA/BS 复合材料, PLA/BP 复合材料最差。研究可为竹塑复合材料的开发与应用提供有益参考。

关键词: 竹塑复合材料; 竹纤维; 聚乳酸; 微观形态; 力学性能

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)01-0032-06

Effects of bamboo fiber species on properties of polylactic acid based bamboo plastic composites

GONG Xinhuai^{1,2}, HUANG Yaokun¹, GE Liangwang¹, CAI Jiayuxu¹, JIN Fulu¹, XIAO Feng¹

(1. Ecology and Resources Engineering College, Wuyi University, Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of Bamboo Ecological Industry,

Wuyishan 354300, China; 2. College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Engineering Research Center of

Environment-Friendly Functional Materials, Ministry of Education, Xiamen 361021, China)

Abstract : In order to make high-valued use of the bamboo processing waste, four kinds of bamboo filler/poly(lactic acid) (PLA) composites were manufactured by melt blending method with PLA as matrix, bamboo flour (BF), bamboo scarps (BS), bamboo nature fiber (BN) and bamboo pulp fiber (BP) as fillers, the effects of fiber morphology on the structure and properties of the composites were studied. The results show that BP and BN show a higher length-diameter ratio, and most of the BS are particle shape, the texture of BF and BS are more rigid. The blends of the BF and BN composited with PLA show a higher torque, the water absorption rate of PLA/BP composites are highest compared with other composites. BF, BS, and BN are well interfacial combined with PLA matrix and the mechanical properties of the composites are improved by the addition of the three kinds of bamboo fibers, while the addition of BP reduced the mechanical properties of the composites. Compared to the pure PLA materials, the tensile strength of PLA/BF, PLA/BS, and PLA/BN composites are increased by 17.85%, 13.6% and 11.89% with 30% content of bamboo fillers, the impact strength are increased by 24.33%, 18.70% and 35.57%, and the bending strength are increased by 19.45%, 21.45% and 4.99% respectively. The comprehensive mechanical properties of PLA/BF composites are the best, which are followed by PLA/BS composites, and the PLA/BP composites are the worst. This study can provide useful reference for the development and application of plastic-bamboo composites.

Keywords : bamboo filler-plastics composite ; bamboo fiber ; poly(lactic acid) ; microscopic morphology ; mechanical property

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2018J01445, 2021J011140), 福建省大学生创新训练计划项目(S202210397039), 福建省本科教研项目(FBJG20210037), 武夷学院教科研项目(JG202124, YJ201810, 2020-SSTD-009)

通信作者: 龚新怀, 博士, 副教授, 主要从事生物质资源利用及高分子复合材料研究

收稿日期: 2023-10-25

引用格式: 龚新怀, 黄焱焱, 葛良望, 等. 竹质纤维形态对聚乳酸基竹塑复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(1):32-37.

GONG Xinhuai, HUANG Yaokun, GE Liangwang, et al. Effects of bamboo fiber species on properties of polylactic acid based bamboo plastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):32-37.

木塑复合材料(WPC)具有植物材质外观、防水防潮、成型简便、成本低及可反复加工使用的特点,在交通、建筑、运输及装修等领域有着广泛应用前景^[1-3]。

在WPC中,植物纤维的增强能力主要取决于植物纤维的特性和纤维与树脂间的界面粘结强度^[4],其中纤维形态、特性对复合材料结构与性能具有重要影响^[5]。Chen等^[6]发现木纤维直径增加,其制备的WPC复合材料力学性能提高;徐开蒙等^[7]选取了6种不同特性的木质纤维与聚氯乙烯(PVC)复合制备WPC复合材料,结果表明木质纤维长度、长径比及接触角值均较高的材种较适合制备WPC复合材料。Migneault等^[8]研究了纤维长度对高密度聚乙烯(PE-HD)/桦木化学浆复合材料性能的影响,发现纤维长度增加有利于WPC复合材料的力学性能。但高珣等^[9]研究发现,随杨木纤维直径增加,WPC复合材料的力学性能先上升后下降,并在其直径为0.21~0.29 mm时出现最大值。孔展等^[10]则发现随木粉直径增大,PVC/木粉复合材料的弹性模量逐渐减小。王海刚等^[11]的实验结果显示,针状木纤维与PE-HD共混成型的复合材料力学性能优于片状或粉末状木纤维。Ariño等^[12]研究了不同形态纤维在加工过程的变化,发现长纤维更易聚集成团,在混炼、加工作用下更容易发生断裂及破裂,短细纤维分散更均匀,有利于其增强作用发挥。目前国内外研究更多是聚焦于对木质纤维的形态、特性等因素对WPC力学性能的影响,对其他植物纤维特性的影响研究报道较少。

中国竹材资源丰富,竹材生长周期短,3~5年即可成材使用,且随着国内“以竹代木”战略口号提出,以竹材制备的竹纤维及其复合材料将得到进一步推广、应用^[13-14]。唐启恒等^[15]报道了单根竹纤维和竹纤维束对聚丙烯基竹塑复合材料力学性能的影响,发现在纤维总含量不变情况下,单根竹纤维含量增加,复合材料力学性能提高。

但竹质纤维形态有纤维状、粉状、颗粒状及单根纤维、纤维束等形态,不同种类及形态竹质纤维具有不同的化学组成,这些因素对复合材料的结构、性能具有重要影响。聚乳酸(PLA)力学和加工性能优良,无毒环保,是最有前景的可降解树脂之一,可用于替代石油基树脂^[16]。因此笔者选用竹粉纤维(BF)、竹屑纤维(BS)、竹原纤维(BN)与竹浆纤维

(BP)四种竹质纤维为原料,制备PLA基竹塑复合材料,考察不同竹质纤维原料对复合材料结构与性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

BF:福建世竹环保科技有限公司,机械球墨制备,用标准分样筛选用80~200目(75~200 μm)粒径范围使用;

BS:80~200目,胜龙竹木工艺品厂;

BN:平均长度20 mm左右,平均直径50~100 μm,福建农林大学;

BP:平均长度为756.8 μm,平均直径为17.5 μm,广州市金木纸业有限公司;

PLA:熔体流动速率为22 g/min (2.16 kg, 190 °C),深圳光华伟业实业有限公司;

甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝PLA:自制,接枝率为4.88%^[17]。

1.2 仪器及设备

转矩流变仪:XSS-300,上海科创橡塑机械设备有限公司;

塑料注射成型系统:SA600/150,宁波海天塑料机械集团有限公司;

电子式万能试验机:ETM104B,深圳万测试验设备有限公司;

液晶式塑料摆锤冲击试验机:ZBC7251-B,美斯特工业系统有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):VEGA3SBH,捷克泰思肯公司。

1.3 试样制备

竹质纤维使用前经105 °C鼓风干燥12 h,PLA树脂经80 °C鼓风干燥3 h,以备混炼。将竹质纤维、PLA及增容剂按质量配比30/60/10称料、混匀,然后转入转矩流变仪中混炼,混炼完成后出料,并用塑料粉碎机粉碎,收集粒料并转入注塑机中注射成型,得到标准测试样条。注塑温度165~190 °C,注塑压力45~55 MPa,保压时间5 s。

1.4 测试与表征

1.4.1 力学性能

拉伸性能按GB/T 1040.2-2006测试,速度5 mm/min,试样尺寸为(150.0±2.0) mm×(10.0±0.2) mm×(4.0±0.2) mm;

弯曲性能按GB/T 9341-2008测试,速度2 mm/

min, 试样尺寸为 100.0 mm × 10.0 mm × 4.0 mm, 跨距 60 mm, 挠度 6 mm;

缺口冲击强度按 GB/T 1043-1993 测试, B 型缺口, 尺寸 80.0 mm × 10.0 mm × 4.0 mm。试样平行测定 5~6 次, 取平均值。

1.4.2 加工流变性能

将共混物料转入流变仪中, 从压料圆盘扣住开始计时, 继续混炼 7 min, 并记录混炼刚好结束时的扭矩、料温。混炼温度 180 °C, 速度 50 r/min。

1.4.3 吸水性能

将制备好的 PLA/竹质纤维复合材料在 50 °C 下鼓风干燥 12 h、真空干燥 24 h, 再分别浸渍于去离子水中 2, 4, 8, 16, 24 h, 到时间后取出并用滤纸吸去表面水分并测试其质量, 根据吸水前后的质量变化计算复合材料的吸水率。平行测试 3 次, 取平均值。

1.4.4 微观形态

竹质纤维及 PLA/竹质纤维复合材料拉伸断面喷金处理后, 用 SEM 观察其微观形态, 样品观察前经真空干燥和喷金处理, 加速电压 10 kV。

2 结果与讨论

2.1 竹质纤维形态分析

采用 SEM 观察了 BF, BS, BN 及 BP 等 4 种竹质纤维的微观形态, 结果如图 1 所示。从图 1 可知, BF 以短细纤维为主, 同时含有少量块状、片状甚至颗粒状纤维形态, 纤维横向尺寸一般在 20 μm 以下(图

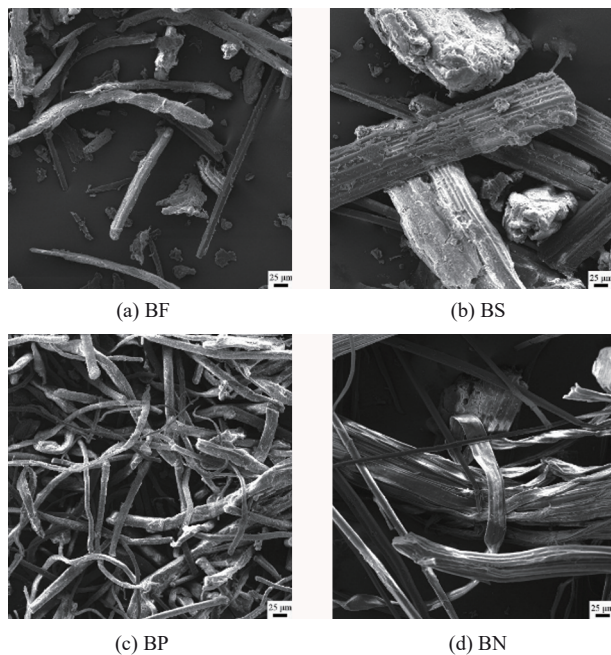


图 1 不同竹质纤维的扫描电镜图

Fig. 1 SEM images of different bamboo fiber species

1a)。BS 颗粒之间形态差异较大, 纤维形态较少, 颗粒形态较多, 颗粒尺寸较大, 可达几百微米(图 1b)。BF 和 BS 纤维为机械法制得的竹质纤维, 保留了竹材中原本组分与构造, 木质素含量更高, 故而呈现刚硬状态^[18]。BP 纤维(图 1c)呈单根纤维状态, BN 纤维(图 1d)多呈束纤维状态。BP 纤维和 BN 纤维的长径比更大, 纤维质地更柔软, 呈现一定纤维缠绕形态, 尤其 BP 纤维可相互缠绕呈团状。

2.2 复合材料力学性能分析

PLA/竹质纤维复合材料的力学性能测试结果如图 2 所示。从图 2 可知, 与纯 PLA 相比, PLA/BF, PLA/BS, PLA/BN 复合材料的拉伸强度分别提高了 17.85%, 13.6%, 11.89%(图 2a), 冲击强度分别提高了 24.33%, 18.70%, 35.57%(图 2b), 弯曲强度分别提高 19.45%, 21.45%, 4.99%(图 2c)。表明 BF, BS, BN 三种竹质纤维的添加, 改善了 PLA 复合材料的力学强度。而 BP 纤维的添加, 则使 PLA 复合材料的力学性能则出现不同程度的下降, 其拉伸、冲击和弯曲强度比 PLA 分别下降了 24.60%, 31.67%, 25.38%。这可能是因为 BF, BS, BN 纤维主要通过物理机械作用制备, 完全或者较大程度保留了竹材原本组分特点, 具有增强功能, 尤其是短细竹质纤维, 增强效果更明显, 这与 Ariño 等^[12]研究结果是一致的。而 BP 纤维制备中受化学疏解作用强烈, 木质素等刚性组分溶解失去, 纤维束被充分疏解, 纤维较细, 相互缠绕难以充分分散, 不利于纤维增强作用发挥^[19]。BF, BS, BN, BP 四种竹质纤维的添加, 都使复合材料的断裂伸长率下降, 与 PLA 相比, 其分别下降了 12.4%, 28.9%, 47.03%, 60.44%(如图 2d)。这是由于竹质纤维作为一种刚性填料, 其添加必然导致柔性的树脂刚性增加, 柔韧性下降, 出现断裂伸长率下降; 同时竹质纤维为极性填料, 其与非极性的树脂间会形成界面相分离形态, 导致树脂连续性下降。但 BF 纤维添加对 PLA 竹塑复合材料柔韧性影响最小, 而 BP 纤维添加影响最大。

此外, 从图中还可知, BF 添加对复合材料拉伸强度改善效果最优, BS 次之; BN 添加对复合材料冲击强度改善效果最优, BF 次之; BS 添加对复合材料弯曲强度改善效果最优, BF 次之。由上述分析可知, PLA/BF 对复合材料的综合力学性能最优, PLA/BS 复合材料次之、PLA/BN 复合材料第三, PLA/BP 复合材料最差。

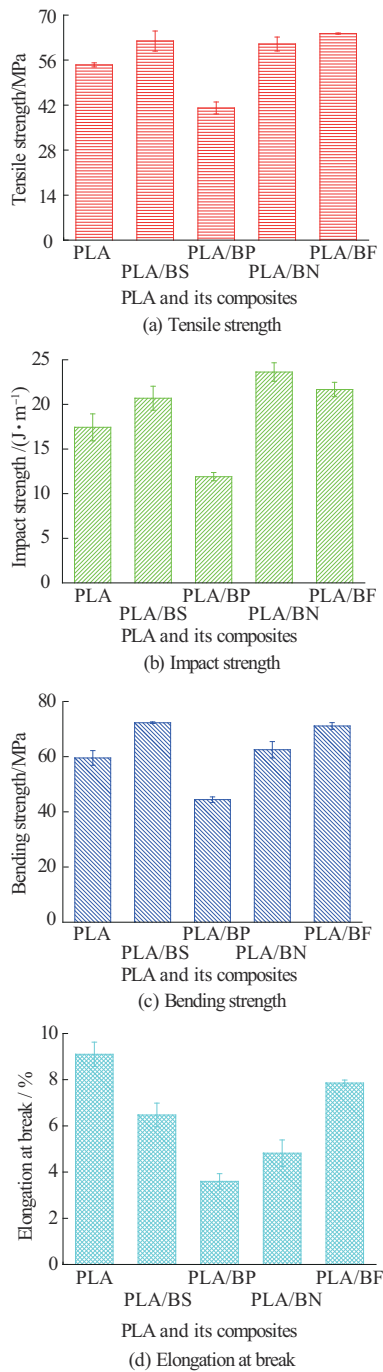


图2 PLA/不同竹质纤维复合材料的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of PLA/different bamboo fiber composites

2.3 复合材料断面形貌分析

图3为PLA/不同竹质纤维复合材料的拉伸断面形态,图3a~图3d分别为PLA/BF复合材料、PLA/BS复合材料、PLA/BP复合材料和PLA/BN复合材料的断面微观形态图。

从图3a中看出BF纤维分散比较均匀,BF纤维被基体树脂紧密包裹,看不到BF与基体树脂之间的界面空隙或孔洞,表明PLA/BF复合材料中的界

面相容性较好,制备的PLA/BF复合材料具有较好的力学性能。

从图3b中看出大小不一的BS颗粒镶嵌在基体树脂中,BS颗粒保持完整形貌,在拉伸作用基本结构没有被破坏,BS被基体紧密包裹。

从图3c中可看到PLA/BP复合材料的界面上有许多孔洞,这是BP纤维被拉伸拔出后留下的孔洞,同时还有BP纤维被拉伸拔出的痕迹,断面不平整,表明BP纤维与树脂间的界面结合力较弱。这可能是由于BP纤维的相互缠绕,不利于增容剂的界面增容,导致BP纤维部分表面未有效与增容剂偶联,与PLA基体界面结合不牢固所致,这也证实PLA/BP复合材料力学性能较差,佐证了3.1处的结论。

从图3d可见断面比较粗糙,纤维与树脂结合较紧密,未见明显的纤维与树脂分离形成的孔洞。BN纤维尺寸较大,由竹束纤维聚集而成,断面可见BN纤维被拉断破坏。

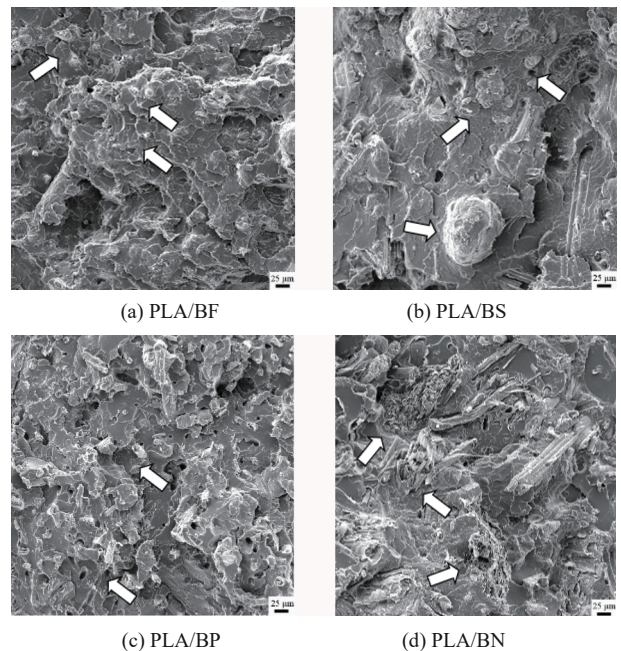


图3 PLA/不同竹质纤维复合材料的拉伸断面形貌

Fig. 3 Tensile fracture morphology of PLA/different bamboo fiber composites

2.4 复合材料加工流变性分析

PLA/四种竹质纤维复合材料的加工流变性能结果见表1。从表1可知,PLA/BN,PLA/BF复合材料混炼时熔体平衡扭矩和平衡料温更大,BP和BS的更小。这可能是由于BN纤维为长丝状,在混炼加工时易相互缠绕阻碍流动,使得熔体扭矩增大,导致熔体平衡料温增大,进而可能导致纤维被扯断

和破坏,反而是短细纤维有利于加工和增强^[12]。BF与基体的界面相容性较好(如图3a),二者界面结合紧密,形成类似交联作用,导致熔体扭矩增大。而BS主要为颗粒形态,不会发生相互间的纤维缠绕,BP纤维与基体结合力弱,难以形成交联作用,因此在混炼时熔体扭矩和料温较低。

表1 PLA/不同竹质纤维复合材料的加工流变性能

Composite species	Balancing torque/(N·m)	Balancing temperature/°C
PLA/BF	25.6±0.3	183.1±0.4
PLA/BP	17.6±0.9	179±0.3
PLA/BS	17±0.6	178.3±0.2
PLA/BN	25.8±0.4	182.5±0.2

2.5 复合材料吸水性能分析

图4是四种PLA/竹质纤维复合材料的吸水性能比较。从图4可知,PLA树脂吸水率很低,在水中浸泡24 h吸水率大约为0.25%。四种竹质纤维的添加,明显增大了复合材料的吸水性,其中以PLA/BP复合材料的吸水性最大,浸水24 h后其吸水率可达2.41%。这可能是由于BP纤维与PLA基体界面结合作用较弱,导致PLA树脂无法有效包覆强吸水性的BP纤维^[13]。而PLA/BF,PLA/BS,PLA/BN三种复合材料的吸水率相近,浸水24 h后其吸水率分别为1.23%,1.25%,1.29%。这主要是因为PLA极性低,吸水性小,而4种竹质纤维极性大,吸水性强,竹质纤维添加使复合材料的吸水性增加。

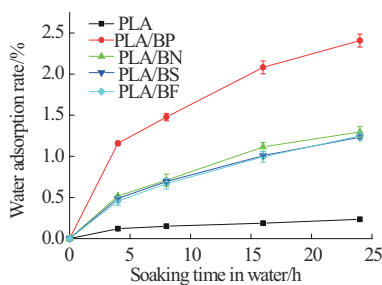


图4 PLA/不同竹质纤维复合材料的吸水性能

Fig. 4 Water absorption properties of PLA/different bamboo fiber composites

3 结论

(1) BP与BN纤维性较好,BS中颗粒性较多,BF与BS纤维质地较刚硬。

(2) BF,BS,BN这3种竹质纤维与PLA基体的界面相容性较好,其添加改善了PLA复合材料的力学强度。与PLA相比,拉伸强度分别提高了

17.85%,13.6%,11.89%,冲击强度分别提高24.33%,18.70%,35.57%,弯曲强度分别提高19.45%,21.45%,4.99%。BP添加降低了复合材料的力学性能。BF添加对复合材料拉伸强度改善效果最优,BN纤维添加对复合材料冲击强度改善效果最优,BS添加对复合材料弯曲强度改善效果最优。PLA/BF复合材料的综合力学性能最优。

(3) PLA/BF,PLA/BN复合体系混炼加工扭矩更大。PLA/BP复合材料吸水率最大,其余相近。

参考文献

- [1] DURMAZ S, KELES O O, ARAS U, et al. The effect of zinc oxide nanoparticles on the weathering performance of wood-plastic composites[J]. *Coloration Technology*, 2023, 139(4):430-440.
- [2] 张璐,孙金鹏,俞青源,等.木粉疏水改性对HDPE基木塑复合材料性能的影响[J]. *化工进展*, 2020, 39(9):100-106.
ZHANG Lu, SUN Jinpeng, YU Qingyuan, et al. Effect of hydrophobic modification of wood flour on properties of HDPE based wood plastic composites[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(9):100-106.
- [3] 余佳明,李祥瑞,林宇,等.基于三种可降解塑料的绿色复合材料研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(8):172-177.
YU Jiaming, LI Xiangrui, LIN Yu, et al. Research progress of green composites based on three degradable plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(8):172-177.
- [4] PELTOLA H, PÄÄKKÖNEN E, JETSU P, et al. Wood based PLA and PP composites: Effect of fibre type and matrix polymer on fibre morphology, dispersion and composite properties[J]. *Composites: Part A*, 2014, 61:13-22.
- [5] ASHORI A, NOURBAKHSH A. Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(7):2 515-2 519.
- [6] CHEN H C, CHEN T Y, HSU C H. Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites[J]. *Polymer Composites*, 2008, 29(6):606-610.
- [7] 徐开蒙,陈太安,吴章康,等.不同木质纤维原料对PVC木塑复合材料力学性能的影响[J]. *西南林业大学学报*, 2015, 35(5):88-91.
XU Kaimeng, CHEN Taian, WU Zhangkang, et al. Effect of six wood species on the mechanical properties of PVC-based wood plastic composites[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2015, 35(5):88-91.
- [8] MIGNEAULT S, KOUBAA A, ERCHIQUI F, et al. Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 110(2): 1 085-1 092.
- [9] 高珣,程万里,王海刚,等.杨木纤维几何形态对木塑复合材料性能的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(2):100-103.
GAO Xun, CHENG Wanli, WANG Haigang, et al. Effect of wood fiber geometry on the properties of wood-plastic composites[J].

- Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(2):100–103.
- [10] 孔展,张卫勤,方吕,等. PVC/木粉复合材料的性能研究[J]. 塑料工业, 2005, 33(10):17–20.
KONG Zhan, ZHANG Weiqin, FANG Lyu, et al. Studies of mechanical properties of wood flour/PVC composites[J]. China Plastics Industry, 2005, 33(10):17–20.
- [11] 王海刚,宋永明,王清文,等. 针状木纤维/HDPE复合材料的力学性能[J]. 林业科学, 2006, 42(12):108–113.
WANG Haigang, SONG Yongming, WANG Qingwen, et al. Mechanical properties of needle-shaped wood-fiber/hdpe composites[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(12):108–113.
- [12] Ariño R, BOLDIZAR A. Barrier screw compounding and mechanical properties of EEA copolymer and cellulose fiber composite[J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 2013, 28(4):421–428.
- [13] 赵升云,龚新怀,王兆礼. G MA接枝反应PLA及其对竹纤维/PLA复合材料的增容效应[J]. 高分子通报, 2018(11):60–67.
ZHAO Shengyun, GONG Xinhui, WANG Zhaoli. Glycidyl methacrylate grafted onto polylactic acid improving the interfacial compatibility of bamboo fiber/polylactic acid biomass composites[J]. Polymer Bulletin, 2018(11):60–67.
- [14] LONG Haibo, WU Zhiqiang, DONG Qianqian, et al. Effect of polyethylene glycol on mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polylactic acid composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(26):47 709–47 717.
- [15] 唐启恒,程海涛,王戈,等. 竹纤维组合形态对竹纤维/聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(11):2 561–2 567.
TANG Qiheng, CHENG Haitao, WANG Ge, et al. Effect of the combination forms of bamboo fiber on properties of bamboo fiber/polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(11):2 561–2 567.
- [16] NASER A Z, DEIAB I, DARRAS B M. Poly(lactic acid)(PLA) and polyhydroxyalkanoates(PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: A review[J]. RSC Advances, 2021, 11(28):17 151–17 196.
- [17] 龚新怀,辛梅华,李明春,等. 增容剂改善茶粉/聚乳酸生物质复合材料性能[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2):308–314.
GONG Xinhui, XIN Meihua, LI Mingchun, et al. Compatibilizer improving properties of tea dust/polylactic acid biomass composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2):308–314.
- [18] 温晓芸,郑蓉,郑维鹏. 竹原纤维和竹粉纤维形态和化学成分分析[J]. 世界竹藤通讯, 2015, 13(5):12–15, 20.
WEN Xiaoyun, ZHENG Rong, ZHENG Weipeng. Analysis on fiber morphology and chemical composition of bamboo powders and bamboo original fibers[J]. World Bamboo and Rattan, 2015, 13(5):12–15, 20.
- [19] 刘一山,何廷龙,伍安国,等. 竹纤维的种类及其应用[J]. 纸和造纸, 2023, 42(1):1–7.
LIU Yishan, HE Tinglong, WU Anguo, et al. The classification of bamboo fiber and its application[J]. Paper and Paper Making, 2023, 42(1):1–7.