

# 长竹纤维束定向增强聚丙烯复合材料

韩雨潼, 王旷, 卜香婷, 李大纲

(南京林业大学 材料科学与工程学院, 南京 210037)

**摘要:** **目的** 以我国资源丰富的竹子和聚丙烯(PP)作为原料,研究竹材的预处理和成形工艺对其物理力学性能的影响,扩大竹材的应用领域。**方法** 通过碱液预处理,对竹条进行软化分丝。然后,利用热压技术将所提取的竹子与聚丙烯进行复合,并调节热压工艺,得出最优参数。**结果** 使用质量分数为6%的NaOH,在100℃下预处理2.5 h,通过辊压疏解,制备长竹纤维束(LBF),LBF的抗拉强度为397.2 MPa。经过处理后,LBF/PP复合材料的储能模量达到9.49 GPa,比未处理的LBF/PP复合材料提升了11.5%。确定了最优热压条件:温度为190℃、时间为20 min、压力为6 MPa。随着长竹纤维含量的增加,LBF/PP复合材料的耐水性降低。**结论** 使用长竹纤维束所制备的LBF/PP复合材料具有优异的物理力学性能,有望作为结构材料应用于集装箱、托盘等,在包装应用领域有较好的前景。

**关键词:** 聚丙烯;竹塑复合材料;长竹纤维束;热压工艺;力学性能

中图分类号:TB332 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2022)13-0017-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.003

## Long Bamboo Fiber Bundle Directional Reinforced Polypropylene Composite

HAN Yu-tong, WANG Kuang, BU Xiang-ting, LI Da-gang

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare high performance long bamboo fiber bundle/polypropylene composite with rich bamboo and polypropylene (PP) in China, explore the effects of bamboo pretreatment and molding process on the physical and mechanical properties of the composite and broaden the application of bamboo material. The bamboo strips were softened and devillicated through pretreatment with alkali liquor. Then, the extracted bamboo was composed with polypropylene through hot pressing. The optimal parameters were obtained by adjusting the hot pressing process. After pretreatment with 6% sodium hydroxide at 100 °C for 2.5 h and decompression by roller, LBF was prepared. The tensile strength of LBF reached 397.2 MPa. After pretreatment, the energy storage modulus of LBF/PP composite was 9.49 GPa, which was 11.5% higher than that of the untreated LBF/PP composite. The optimum hot pressing process was determined as follows: temperature 190 °C, time 20 min, pressure 6 MPa. With the increase of bamboo fiber content, the water resistance of LBF/PP composite was decreased. LBF/PP composites prepared with long bamboo fiber bundles have excellent physical and mechanical properties, and are expected to be used as structural materials for containers and pallets, and have a good prospect in packaging application.

**KEY WORDS:** polypropylene; bamboo plastic composites; long bamboo fiber bundle; hot pressing process; mechanical property

收稿日期: 2021-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(031020151)

作者简介: 韩雨潼(1998—),男,南京林业大学硕士生,主攻生物质复合材料。

通信作者: 李大纲(1959—),男,博士,南京林业大学教授,主要研究方向为新型包装材料、纳米纤维素制备。

近年来,高分子复合材料在工业上应用较为广泛<sup>[1-2]</sup>。由于无机纤维的使用,复合材料往往加剧了对环境的污染。生物质材料因其生物降解性好、温室气体排放少、基材可再生等特点受到了广泛的关注<sup>[3]</sup>。

竹纤维(BF)是天然纤维中很受欢迎的一种材料,其比强度几乎可以与玻璃纤维相媲美。竹子不但能快速成长,而且在3年内可以达到最佳强度,同时,它的力学性能也比其他天然纤维要好。竹类纤维具有较大的比表面积,优良的力学性能,可再生性,生物降解性,密度低,价格低廉等优点,使它具有广阔的工业前景<sup>[4-5]</sup>,因此,竹材是天然纤维复合材料开发的一种合适选择。竹材纤维表面化学极性较强,且与聚丙烯等树脂材料界面相容性较差,从而导致了内部应力在界面中无法实现高效传递,严重影响了材料的综合性能<sup>[6-8]</sup>。在生产竹纤维/聚丙烯复合材料(LBF/PP)过程中,怎样改善亲水型的BF表面与疏水性PP界面的相容性是必须研究的重点课题。碱法是一种较好的处理方式,它并不会引起纤维的化学结构改变,却会使其物理性质改变,碱处理可以增大纤维比表面积,使纤维与PP的有效接触面增加,从而增强机械黏合力<sup>[9-14]</sup>。

目前,国内学者已广泛使用竹粉和短竹纤维作为增强材料,并经过分析研究表明,纤维的长径比如果不足20,其结构在材料中仅具有填充的功能,对材料的强化作用小<sup>[15-17]</sup>。

为了从竹条中最大程度制备提取长竹纤维束,设置预处理温度为100℃,通过碱液预处理、辊压疏解等工艺制备长竹纤维束(LBF),研究碱液预处理对长竹纤维束的影响。同时,为使竹纤维束的定向增强效果最大化,采用热压成型技术制备LBF/PP复合材料,通过改变工艺系数以及LBF的体积分数,进一步探讨其在LBF/PP复合材料上的力学性能以及在微观状态的改变情况<sup>[18]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 材料

主要材料:竹条,建瓯蒲公英竹叶有限公司;PH-5567等规聚丙烯,陶氏化学。

### 1.2 仪器

主要仪器:S65三辊研磨仪,三丰公司;ZG-50TSD手动压片机冷热型,东莞市正工公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 原材料的预处理

配置质量分数为5%的NaOH溶液,将竹条和质量分数为5%的NaOH溶液放置于烧杯中(质量比为1:5),固定蒸煮时间6h,经60℃水浴加热后得到

碱处理竹条。通过三辊压延机对碱处理竹条进行辊压疏解,再放置于70℃真空干燥箱中干燥24h,梳理后得到LBF。

#### 1.3.2 LBF/PP复合材料的制备

称取绝干的LBF和PP,使LBF被PP粉末层层包裹,通过使用分段式加热加压对材料进行复合:在第1阶段,采用预压压力为2MPa、热压温度为160℃、预压为120s,经水循环冷却降至室温后,从模具中脱模。将制备好的LBF/PP复合材料裁切成长度为30cm、宽度为2cm的薄片后进行二次热压(压力为4MPa、温度为170℃、预压为300s)。第2阶段时,经冷压处理(时间为15min、压力为6MPa)后,冷却至室温脱模后得到样条。

通过正交实验法,探讨不同体积分数(50%、60%、70%、80%)的LBF、温度(160、170、180、190℃)、压力(2、4、6、8MPa)、时间(10、15、20、25min)对材料力学性能影响。

## 1.4 测试与表征

### 1.4.1 力学性能测定

使用万能力学试验机对试样开展了抗弯性能的测试,参照ASTM-D790-2010进行。室温下,将试件夹持在夹具上,调整应力和应变为零,试件宽度为20mm,厚度为3mm,设定跨度为52mm、下压速率为5mm/min进行测试。每个样本进行5次重复测试,计算标准差。

### 1.4.2 红外光谱分析测定

用Nicolet IS10能谱仪在600~4000 $\text{cm}^{-1}$ 波段范围内,每个光谱的分辨率为4 $\text{cm}^{-1}$ ,采集了长竹纤维和通过层积模压成型制备的LBF/PP复合材料的红外光谱图。每种样品观察4次,确定特定基团的峰变化。

### 1.4.3 复合材料动态力学分析测定

通过动态力学分析仪(DMA)对复合材料的动态粘弹性能进行测试。在单悬臂模式下,以3种不同的频率(1、2、5Hz)进行实验。温度测量范围为-60~120℃,动态载荷为2N,振幅为60 $\mu\text{m}$ 。保护气氛为氮气。

### 1.4.4 扫描电子显微镜(SEM)测试

通过SEM观察复合材料,其中复合材料用液氮冷冻后迅速冲击脆断。样品在拍摄前预先50℃干燥12h,将试样黏合在试样台上,然后把试样放入离子溅射装置内,然后盖上空腔盖,所有样品喷金30~60s以避免导电。

将镀金后的试样置于电镜观测室,在抽空后调整试样与电子枪的间距为8mm,设置10kV的加速电压,涂层电流10mA,选择适当的放大倍数及点位进行观测。

### 1.4.5 吸水率测试

根据 GB/T 1034—2008 测试吸水率和厚度膨胀率, 吸水率 ( $W_a$ ) 和厚度膨胀率 ( $T_s$ ) 的计算式见式 (1) — (2)。

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

$$T_s = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为在浸渍之前干燥后样品的质量, mg;  $m_2$  为在浸渍后样品的质量, mg;  $d_1$  为浸渍之前干燥后样品的厚度, mm;  $d_2$  为浸渍后样品的厚度, mm<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 碱液预处理对 LBF 的影响

不同条件下碱液预处理对 LBF 的影响见图 1a, LBF 中半纤维素的降解速度随 NaOH 浓度的增大而加速, 含胶率迅速降低, 在 NaOH 的质量分数为 5% 时, NaOH 的溶解速率达到饱和状态。在 NaOH 质量分数小于 5% 时, LBF 的拉伸强度随 NaOH 浓度的升高而提高<sup>[21]</sup>, 而当质量分数高于 6% 时, 纤维素可能

发生降解或结构损伤, 所以拉伸性能有所下降 (图 1a)。随着反应时间延长, 竹材内的木质素、半纤维素的溶出增加, 在反应期间, 竹材的脱胶由外向内进行, 反应时间短时, 只与竹材表面的胶体发生反应, 但随反应时间的增加, 碱液渗透到竹材内部, 胶质快速溶出, 更有助于 LBF 的制备, 因此拉伸性能提高 (图 1b)。温度过低时, 反应速率较低, 胶质溶解速度较慢, 当温度升高至 90 °C 后, 胶质溶解速度急剧提升, 拉伸强度提高 (图 1c)。碱液质量分数对 LBF 的制备影响大于预处理温度、时间。综合除胶率和拉伸性能等因素的影响, 确定 NaOH 的质量分数为 6%, 在 100 °C 下处理 2.5 h 为较佳处理工艺。

由图 2 可看出, 长竹纤维定向增强聚丙烯复合材料储存模量在整个温度范围, 较 PP 有大提高。由于长竹纤维束的加入使复合材料的刚性大大增强。当材料受外力作用时, 作为增强材料的长竹纤维束可承担大部分载荷, 吸收大量的应力, 因而使复合材料呈现出高动态刚性。随着温度的升高, PP 分子链滑移快速增加, 复合材料整体刚性降低, 因而储存模量下降。碱处理长竹纤维束作增强材料时, 碱进一步溶去了长竹纤维束表面杂质, 使纤维表面更洁净, 比表面积增大, 机械互锁能力提高, 因而储存模量增加。

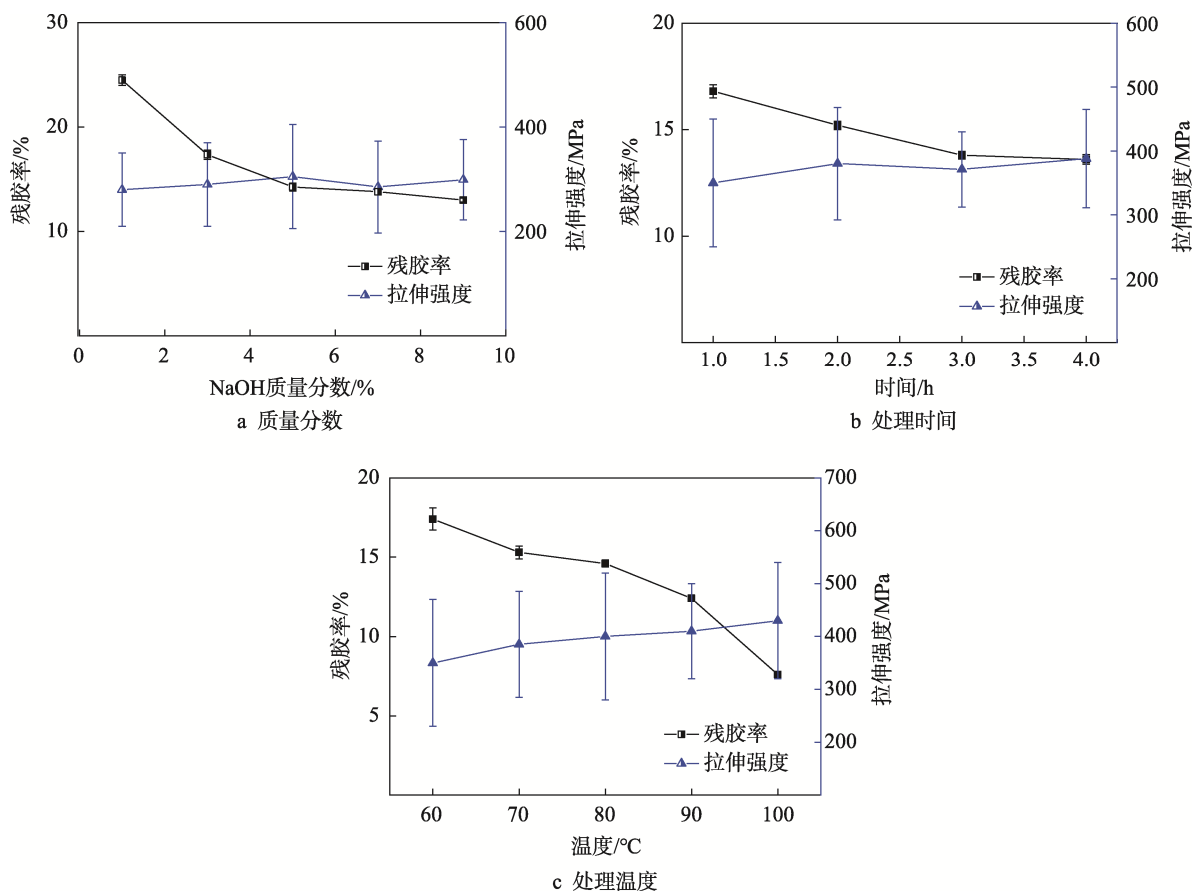


图 1 不同条件下的预处理对 LBF 的性能影响

Fig.1 Effects of pretreatment conditions on LBF performance

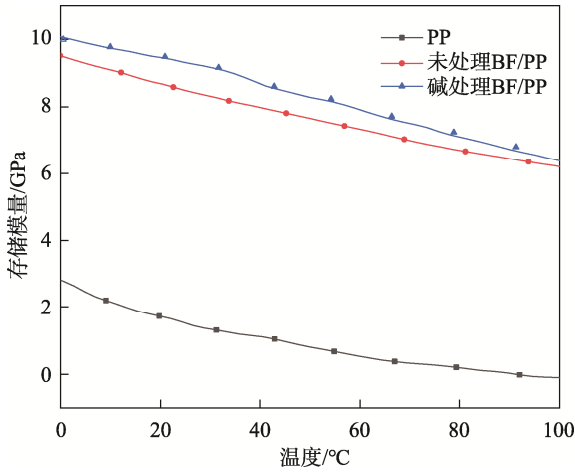


图2 复合材料储能模量随温度变化曲线  
Fig.2 Variations of composite storage modulus with temperature

### 2.2 工艺参数对 LBF/PP 性能影响

热压温度越高，复合材料的力学性能越好（图 3a）。在 190 °C 时，复合材料抗弯强度达到 166.3 MPa，弯曲模量为 10.7 GPa。通过热压，PP 从固体相转变到流动相，随着温度的升高，PP 熔融效果提高，这样可使 PP 得以包覆或渗入 LBF 内，通过低温冷压处

理，PP 重塑成固体相，与 LBF 紧密结合。同时，随着温度的提高，纤维中的半纤维素热降解，羟基数量减少，纤维表面极性降低，有助于与 PP 基体的复合，从而力学性能提高。

热压压力越高，复合材料的力学性能越好（图 3b）。通过热压压力，熔融状态的 PP 进一步渗透到 LBF 表面的空隙，以胶钉形式嵌入，形成良好的物理结合。热压压力增至 6 MPa 后，结果表明，复合材料的抗拉强度提高的趋势明显减弱，复合材料的密度达到高点，在这种情况下，该复合材料抗弯强度为 173.2 MPa，弯曲模量为 14.7 GPa。当热压达到 8 MPa 时，其弯曲模量降低，压力过高时，可能会破坏 LBF 的结构，从而影响刚度。

热压时间越长，复合材料的力学性能越好（图 3c）。在热压时间为 25 min 时，弯曲强度最高为 176.2 MPa 时，此时弯曲模量为 12.6 GPa。PP 的热压时间太短，熔化程度不够，流动性较差，难以实现包裹，材料的均匀性较差。在 20~25 min 的热压时间内，复合材料的力学性能无明显变化，说明在 20 min 时，PP 已经充分熔融，流动性较好，热压时间的延长并不能显著提升 PP 的熔融性。

综上，热压工艺的最佳参数为温度 180 °C、时间 20 min、压力 6 MPa。

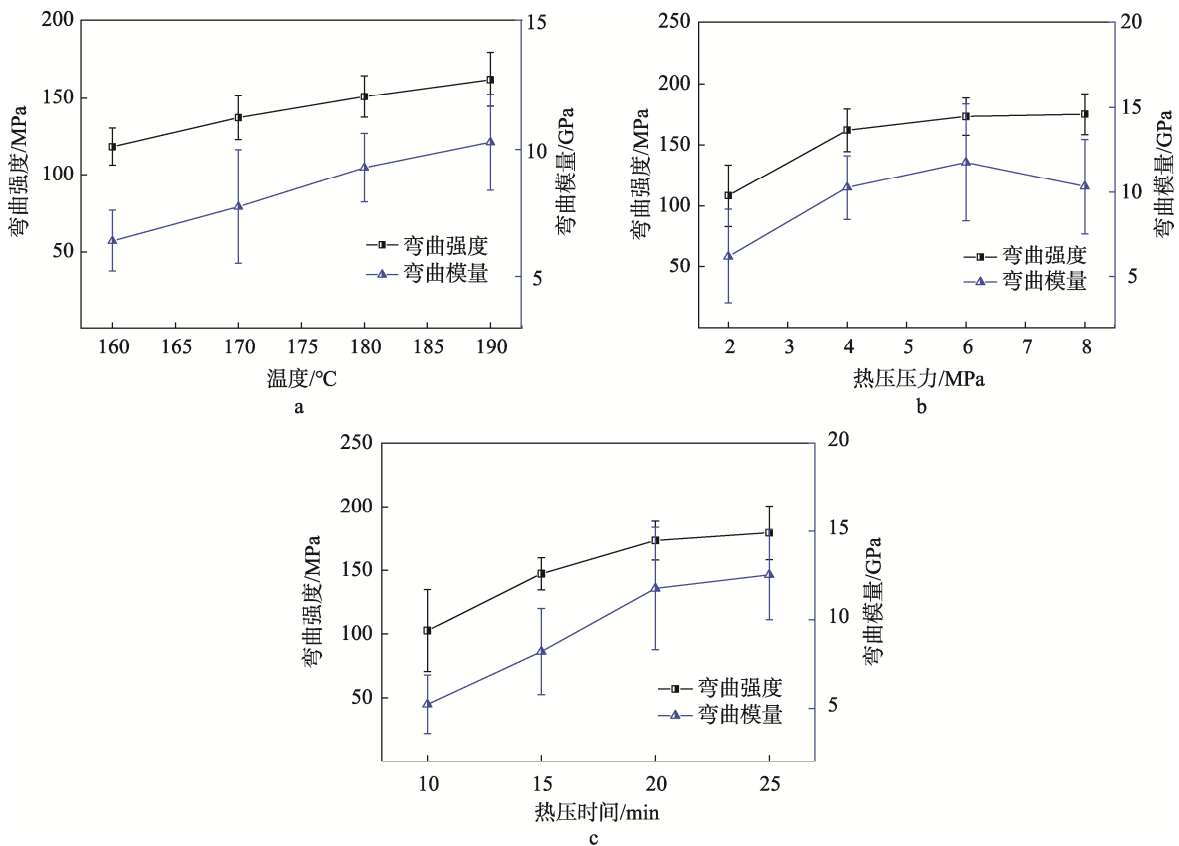


图3 热压工艺对 LBF/PP 复合材料力学性能的影响  
Fig.3 Effects of hot pressing process on mechanical properties of LBF/PP composite

### 2.3 LBF 添加量对 LBF/PP 复合材料物理力学性能的影响

在热压条件相同的情况下,如图 4 所示,LBF 体积分数的增大,其弯曲强度和弯曲模量呈先增大后减小的趋势,在 LBF 体积分数为 70%时达到最大,分别为 212 MPa、16.4 GPa。将 LBF 与 PP 复合制成复合材料后,LBF 和 PP 共同承受承载力。由于 LBF 的承载能力比 PP 大得多,所以在承受了一定的压力后,负载通过 PP 向 LBF 传递,在有效地转移了荷载的情况下,LBF 的含量越高,其在复合材料中“骨架”的作用越明显,复合材料的弯曲性能越好。当纤维体积分数大于 70%时,结果表明,复合材料的抗弯强度和抗弯模量降低。在热压成型工艺中,PP 在较高温度下融化,并在压力作用下向 LBF 间的空隙流动,并进入 LBF 的内孔,在 LBF 表面形成胶钉结构,但当 LBF 体积分数较高时,LBF 束密度较高,熔融的 PP 树脂在纤维内的流动阻力增加,有的位置甚至没有树脂流入,因此,LBF 与 PP 的黏结性降低,界面性能差,内部应力传递不均匀,导致复合材料力学性能有所下降。

复合材料的吸水率 ( $W_a$ ) 和厚度膨胀率 ( $T_s$ ) 随着时间的延长,呈现出先迅速增长,而后趋于平缓的趋势(图 5)。在 72 h 时, $W_a$  和  $T_s$  达到饱和状态。在理想状态下,复合材料的上下 2 层均由聚丙烯树脂包覆,其吸水性接近于 0。复合材料的  $W_a$  和  $T_s$  均随纤维含量的增加而提高,纤维体积分数越小,PP 树脂越可以尽可能地包裹住 LBF,纤维体积分数增加至 80%后,复合材料的  $W_a$  和  $T_s$  快速上升,分别为 33.4% 和 32.2%。这是由于 LBF 表面含有大量的亲水性羟基,且 PP 的包裹性能较差,导致水分在接触到表面时,会迅速被复合材料吸收。

通过对复合材料的机械性能和耐水性能进行分析得出,在复合材料中 LBF 的体积分数为 70%的情况下综合性能最优,其弯曲强度和弯曲模量分别为 212 MPa、16.4 GPa。在 24 h 时, $W_a$  和  $T_s$  分别为 15.2% 和 10.3%。

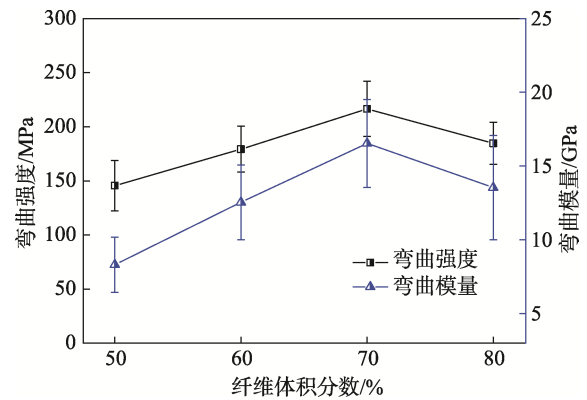


图 4 LBF 体积分数对 LBF/PP 复合材料力学性能影响  
Fig.4 Effects of LBF proportion on mechanical properties of LBF/PP composite

### 2.4 LBF/PP 复合材料断面微观形貌分析 (SEM)

LBF/PP 复合材料的断面微观形貌分析图见图 6,利用扫描电镜对不同含量碱处理的 LBF 复合材料的断面结构进行了表征。当 LBF 体积分数为 50%时,LBF 被 PP 完全包裹,但此时由于 LBF 含量较低,在复合材料中所起到的骨架结构作用较弱,因此弯曲强度较差。由于 PP 树脂对 LBF 的有效包裹,使得复合材料具有良好的耐水性能。当 LBF 体积分数为 70%时,断面上 PP 含量减少,PP 对 LBF 的包裹不均匀,复合材料的耐水性能下降。

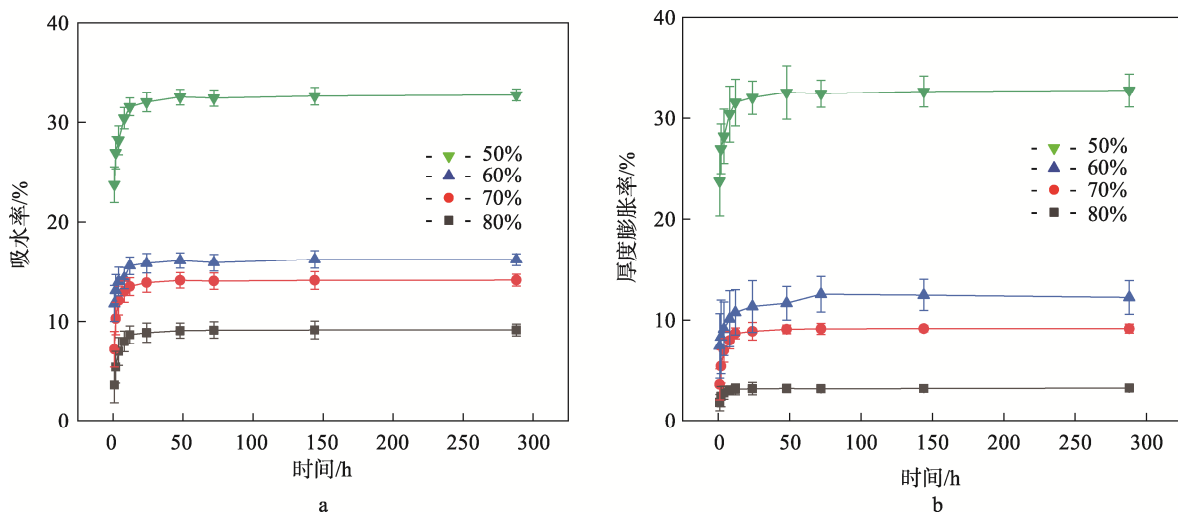


图 5 LBF 体积分数对 LBF/PP 复合材料吸水率和厚度膨胀率的影响  
Fig.5 Effects of LBF volume fraction on water absorption and thickness swelling of LBF/PP composite



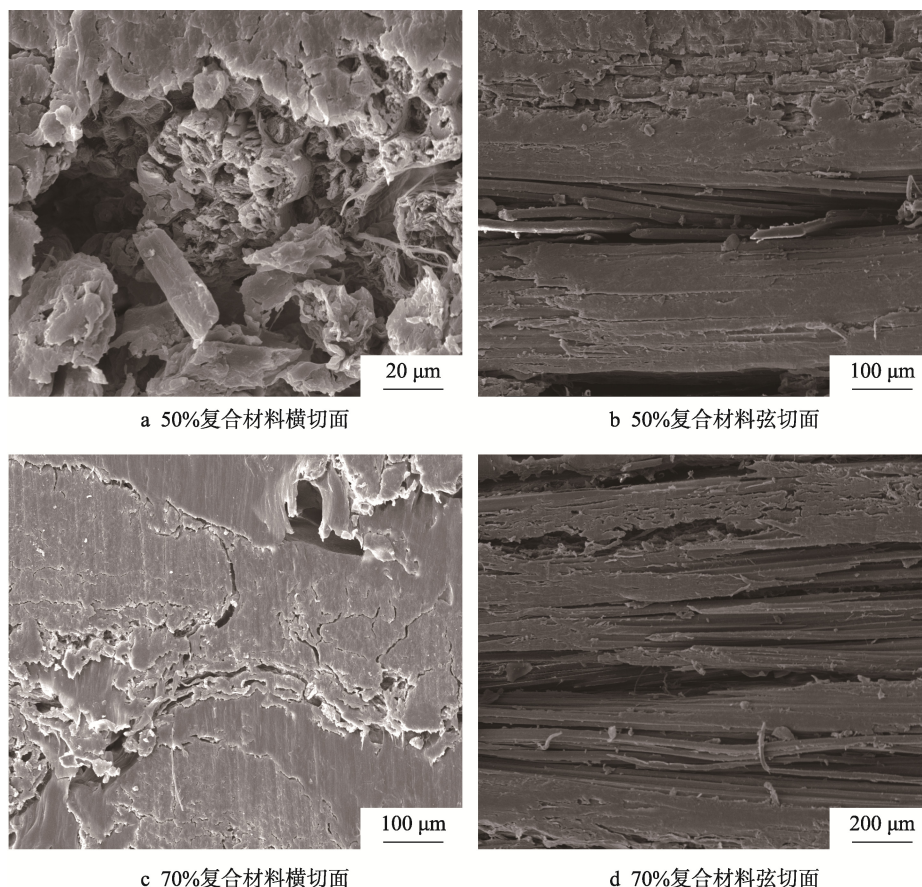


图6 LBF/PP复合材料的断面微观形貌分析  
Fig.6 SEM graphs for cross section LBF/PP composite

### 3 结语

采用质量分数为6%的NaOH,在100℃下预处理2.5h,通过辊压疏解制备长竹纤维束(LBF),LBF的拉伸强度达到了397.2MPa。经NaOH处理的LBF/PP复合材料的储能模量达到9.49GPa,比未经NaOH处理的LBF/PP复合材料提升了11.5%。确定热压工艺条件:温度为190℃、时间为20min、压力为6MPa。在LBF体积分数为70%时,LBF/PP复合材料的力学性能最佳,弯曲强度和弯曲模量分别为212MPa、16.4GPa。随着长竹纤维束在复合材料中体积分数增加,LBF/PP复合材料的吸水率变高。使用长竹纤维束所制备的LBF/PP复合材料具有优异的物理力学性能,有望作为结构材料应用于集装箱、托盘等,在包装应用领域有较好的前景。

#### 参考文献:

- [1] 马建,孙铭,裴悦彤,等.天然生物质纤维增强复合结构材料的制备方法研究[J].甘肃科技,2021,37(18):41-43.  
MA Jian, SUN Ming, PEI Yue-tong, et al. The Research

- on Preparation Methods of Natural Biomass Fiber Reinforced Composite Structural Materials[J]. Gansu Science and Technology, 2021, 37(18): 41-43.
- [2] PAVEL C, PETR B, PAVEL K, et al. Highly Hydrophobic Organosilane-Functionalized Cellulose: A Promising Filler for Thermoplastic Composites[J]. Materials, 2021, 14(8): 342-362.
- [3] CHEN Hong, YU Yan, ZHONG Tu-hua, et al. Effect of Alkali Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Individual Bamboo Fibers[J]. Cellulose, 2017, 24(1): 333-347.
- [4] 马晓宇,刘婷婷,崔素萍,等.生物质材料的制备及其资源化利用进展[J].北京工业大学学报,2020,46(10):1204-1212.  
MA Xiao-yu, LIU Ting-ting, CUI Su-ping, et al. Research Progress on Preparation and Resource Utilization of Biomass Materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(10): 1204-1212.
- [5] 黎晨欣.改性竹纤维/聚丙烯复合材料结构与性能研究[D].上海:上海第二工业大学,2021:53-67.  
LI Chen-xin. Structure and Performance of Modified Bamboo Fiber/Polypropylene Composite[D]. Shanghai: Shanghai Polytechnic University, 2021: 53-67.

- [6] CHEN Hong, ZHANG Wen-fu, WANG Xue-hua, et al. Effect of Alkali Treatment on Wettability and Thermal Stability of Individual Bamboo Fibers[J]. *Journal of Wood Science*, 2018, 64(4): 398-405.
- [7] CHIU H H, YOUNG W B. The Longitudinal and Transverse Tensile Properties of Unidirectional and Bidirectional Bamboo Fiber Reinforced Composites. *Fibers And Polymers*, 2020, 21(12): 2938-2948.
- [8] 周吓星, 袁峰, 王嘉辉, 等. APP/ADP 对竹粉/聚丙烯复合材料的协效阻燃[J]. *林业工程学报*, 2020, 5(6): 36-42.  
ZHOU Xia-xing, YUAN Feng, WANG Jia-hui, et al. Synergistic Flame Retardant of APP/ADP on Bamboo Powder/Polypropylene Composites[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(6): 36-42.
- [9] HU Guang, CAI Shen-yang, ZHOU Ying-hui, et al. Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Poly(Lactic Acid)/Bamboo Fiber Composites via Surface Modification[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(12): 841-852.
- [10] ITO A, SEMBA T, KITAGAWA K, et al. Cell Morphologies and Mechanical Properties of Cellulose Nanofiber Reinforced Polypropylene Foams[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2019, 55(4): 385-400.
- [11] 徐灿. 竹纤维/乙烯基树脂复合材料的 RTM 成型工艺及其性能[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 76-87.  
XU Can. RTM Process and Properties of Bamboo Fiber/Vinyl Ester Resin Composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021: 76-87.
- [12] 李卫林, 林维晟, 杨雯, 等. 碱煮氧化工艺制备竹纤维及结构性能表征[J]. *林产工业*, 2021, 58(1): 6-10.  
LI Wei-lin, LIN Wei-sheng, YANG Wen, et al. Preparation and Structure Characterization of Bamboo Fiber by Alkali-Boiling and NaClO Oxidation[J]. *China Forest Products Industry*, 2021, 58(1): 6-10.
- [13] 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.  
ZUO Ying-feng, LI Ping, LIU Wen-jie, et al. Effect of Alkaline Treatment on the Properties of Bamboo Fiber/Poly(lactic Acid) Biodegradable Composite[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(2): 2006-2012.
- [14] SUN Xiao-feng, HE Min-juan, LI Zheng. Novel Engineered Wood and Bamboo Composites for Structural Applications: State-of-Art of Manufacturing Technology and Mechanical Performance Evaluation[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118751.
- [15] TECHAWINYUTHAM L, FRICK A, SIENGCHIN S. Polypropylene/Maleic Anhydride Grafted Polypropylene (MAGPP)/Coconut Fiber Composites[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(5): 345-354.
- [16] WANG B J, YOUNG W B. The Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Made of Woven Bamboo Fiber and Polypropylene. *Fibers And Polymers*. 2021, 234(6): 233-243.
- [17] YOON H J, GIL B M, LEE H, et al. Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Cellulose Nanofiber Composites[J]. *Polymer Korea*, 2020, 44(3): 255-263.
- [18] 祁献超, 姚文斌, 张蔚, 等. 轻薄型长竹原纤维/环氧树脂复合板材制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(11): 62-67.  
QI Xian-chao, YAO Wen-bin, ZHANG Wei, et al. Preparation and Properties of Light and Thin Type Bamboo Fiber/Epoxy Resin Composite Board[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11): 62-67.
- [19] 左迎峰, 李文豪, 李萍, 等. 竹纤维/聚乳酸可降解复合材料的增塑改性[J]. *林业工程学报*, 2018, 3(1): 77-82.  
ZUO Ying-feng, LI Wen-hao, LI Ping, et al. Plasticization of Bamboo Fiber/Poly(lactic Acid) Degradable Composite[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2018, 3(1): 77-82.
- [20] 赵鹤, 苗庆显, 黄六莲, 等. 竹原长纤维制备及其增强聚丙烯复合材料研究[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(5): 96-103.  
ZHAO He, MIAO Qing-xian, HUANG Liu-lian, et al. Preparation of Long Bamboo Fiber and Its Reinforced Polypropylene Membrane Composites[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(5): 96-103.
- [21] 黄慧. 长竹纤维束提取及其增强聚丙烯复合材料制备[D]. 南京: 南京林业大学, 2018: 54-66.  
HUANG Hui. Extraction of Long Bamboo Fiber Bundles and Preparation of Their Reinforcing Polypropylene Composites[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018: 54-66.