

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.011

轻薄型长竹原纤维 / 环氧树脂复合板材制备及性能

祁献超¹, 姚文斌², 张蔚², 俞伟鹏², 张金焯¹, 徐海宇¹

(1. 浙江农林大学光电工程学院, 杭州 311300; 2. 浙江农林大学暨阳学院, 浙江绍兴 311800)

摘要: 基于轻薄型环保复合材料的推广与应用, 探索了纤维质量分数在 45%~85% 的高纤维含量以及板材厚度在 0.6~1.4 mm 的轻薄型长竹原纤维 (BF, 纤维长度 ≥ 100 mm)/ 环氧树脂 (EP) 热压复合板材的力学性能及吸水性能。结果表明, 随着 BF 含量的增加, BF/EP 复合板材的拉伸和弯曲性能呈现出先提高后降低的趋势, 当 BF 质量分数在 65% 时, BF/EP 复合板材的弯曲强度和弯曲弹性模量达到最大值, 分别为 272 MPa 和 30.245 GPa; BF/EP 复合板材的吸水率随着 BF 含量的增加而增大, 当 BF 质量分数从 45% 增至 65% 时, 其吸水率增幅显著, 当 BF 质量分数超过 65% 时, 其吸水率增幅逐渐趋于平缓。随着板材厚度的增加, 复合材料的拉伸性能和弯曲性能呈现出上升趋势, 当板材厚度从 0.6 mm 增至 1.2 mm 时, 拉伸性能和弯曲性能增幅显著; 当板材厚度从 1.2 mm 增至 1.4 mm 时, 拉伸性能和弯曲性能增幅减缓; 随着板材厚度增加, 其吸水率没有明显的增加或降低趋势。

关键词: 长竹原纤维; 环氧树脂; 轻薄型复合板材; 热压成型; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0062-06

Preparation and Properties of Light and Thin Type Bamboo Fiber / Epoxy Resin Composite Board

Qi Xianchao¹, Yao Wenbin², Zhang Wei², Yu Weipeng², Zhang Jinye¹, Xu Haiyu¹

(1. College of Optical Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;

2. Jiyang College of Zhejiang A & F University, Shaoxing 311800, China)

Abstract : Based on the application and popularization of environmental friendly composites, the mechanical properties and water absorption properties of light and thin long bamboo raw fiber (BF, fiber length ≥ 100 mm)/epoxy resin (EP) composite plates explored by using hot pressing process with high fiber content of 45wt%–85wt% and plate thickness of 0.6–1.4 mm were studied and analyzed. The results show that with the increase of BF content, the tensile and flexural properties of BF/EP composite plates increase first and then decrease. When BF content is 65wt%, the flexural strength and flexural modulus of BF/EP composite plates reach the maximum, which are 272 MPa and 30.245 GPa respectively. The relative mass water absorption percentage of BF/EP composite plate increases with the increase of BF content. When the BF content increases from 45wt% to 65wt%, the increase of relative mass water absorption percentage is significant. When the BF content exceeds 65wt%, the increase of relative mass water absorption percentage tends to be gentle. With the increase of the thickness of BF/EP composite plate, the tensile and bending properties of the composite show an upward trend. When the plate thickness increases from 0.6 mm to 1.2 mm, the increase of tensile and bending properties is significant, and when the plate thickness increases from 1.2 mm to 1.4 mm, the increase of tensile and bending properties slows down. With the increase of plate thickness, the relative mass water absorption percentage has no obvious increase or decrease trend.

Keywords : long bamboo raw fiber ; epoxy resin ; light and thin type composite plate ; hot pressing ; mechanical property

近年来, 人们的环保意识逐步增强, 对于绿色环保新型复合材料 (如天然纤维增强复合材料等) 的研究, 也越来越受到科研人员的重视^[1]。天然纤维有着来源广、成本低、密度小、对人体无危害、对环

基金项目: 浙江省公益性项目 (LGN21C160006), 绍兴市重点创新团队项目 (RC2021A04)

通信作者: 俞伟鹏, 讲师, 主要研究方向为竹纤维制备及应用

收稿日期: 2021-08-16

引用格式: 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 Xianchao, Yao Wenbin, 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.

境无污染、可再生等诸多优点^[2-4],具有非常好的应用前景与附加值。

竹材是我国快速生长、可再生的森林资源之一,可看成是以纤维管束作为增强体、薄壁组织作为基质的天然纤维增强材料^[5-6]。用竹材制取的竹原纤维(BF)具有较高的比强度和比模量,被称之为“天然玻璃纤维”^[7-9]。姚开泰等^[10]通过研究竹龄和竹秆纵向部位对青皮竹物理力学性能的影响发现,青皮竹的密度随竹龄的增大而增大,四年生的青皮竹密度达到最大。

环氧树脂(EP)是高分子复合材料中应用广泛的热固性基体树脂,具有良好的力学性能、耐腐蚀性、绝缘性、粘结性,以及成型加工方便、环保无毒等优点^[11-12]。用BF增强EP制成的复合材料,可改善EP基体冲击性能低、脆性大等缺陷,可获得轻质量、高比强度、低成本、对环境危害小的优质复合材料,该材料可应用于汽车内饰、室内装修、家具制造以及建筑行业等多个领域^[13]。

现阶段,在对BF复合材料的研究中,施江靖等^[14]研究了纤维含量对真空辅助传递成型BF/EP复合材料性能的影响,用该方法制备复合材料的关键是纤维含量的控制,BF的加入可以提高EP的刚性,且随着BF含量增加,BF/EP复合材料的力学性能也随之增加,但树脂注射难度也会持续增加。Zhang Kai等^[15]研究了BF增强EP复合材料的热性能和力学性能,分别将5,10,15 mm长度的短BF加入到EP中。结果表明,随着纤维长度和纤维含量的增加,复合材料的力学性能也随之增加。尽管如此,对于BF长度 ≥ 100 mm的长纤维且BF含量在45%~85%高纤维含量的BF/EP复合材料的研究,以及关于BF/EP复合板材的不同厚度对复合材料性能的影响等相关研究,却较少有科研人员深入探讨。

笔者选用课题组自制的长BF通过热压工艺来制备轻薄型BF/EP复合板材,研究了BF含量在45%~85%时复合板材的力学性能及吸水性能;同时,研究了厚度在0.6~1.4 mm时轻薄型BF/EP复合板材力学性能及吸水性能的关系。

1 实验部分

1.1 原材料

BF为课题组自制,竹材来自于广东广宁四年生的青皮竹,先将竹筒用竹材剖片机剖成1500 mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 mm的竹片,再将剖制好

的竹片放入高压渗透设备中进行高压渗透软化处理,最终将软化完成的竹片通过机械碾压法制成试验所需的长BF。

EP采用的是双酚A环氧树脂(DGEBA, YD-128)与胺类固化剂(5010B)组分,来自温州亦晨实业有限公司。

1.2 设备及仪器

模具、机械碾压开纤机:自制;

热压机:HBSCR-25T/350型,青岛华博机械科技有限公司;

微机控制木材专用试验机:UTM2503型,深圳三思纵横科技股份有限公司;

台式扫描电子显微镜(SEM):EM-30PLUS型,韩国COXEM公司。

1.3 轻薄型BF/EP复合板材的制备

将长BF整理称重并分组,作为备用;按比例调配EP胶液作为备用;采用手工铺层的方式,先将EP和BF在自制模具上进行铺层组胚,再将组胚好的模具放在热压机上进行热压处理。在不锈钢模具底部浸入第一层EP胶液,将事先准备好的BF工整地排列在EP胶液上,用抹刀轻轻按压,确保纤维完全浸润在树脂中。将第二层树脂浇注在第一层纤维上进行界面结合,再将第二层纤维工整地平铺在新的树脂上。重复以上步骤,直到将事先调配好的不同比例的BF和EP恰好均匀完整排列完毕。将铺层后的模具放入到热压机中进行热压固化处理,再将处理后的模具冷却至室温即可开模。所有试验均重复三次。

1.4 性能测试

拉伸性能测试:在微型控制木材专用试验机上进行拉伸试验,参照标准GB/T 1040.5-2008将复合材料制备成尺寸为150 mm $\times$ 15 mm的试件,选定原始标距为100 mm,加载速率为5 mm/min,每组5个试样。

弯曲性能测试:在微型控制木材专用试验机上进行弯曲试验,参照标准GB/T 9341-2008将复合材料制备成尺寸为100 mm $\times$ 25 mm的试件,选定跨距为50 mm,,加载速度为1 mm/min,每组5个试样。

吸水性按照GB/T 1462-2005的方法1进行测试。

密度按照GB/T 1463-2005进行测试。

断面形态分析:将试样进行表面喷金处理,用

SEM 对试样断口形貌进行观察,高真空模式,运行电压 15 kV。

2 结果与讨论

2.1 不同纤维含量 BF/EP 复合材料的力学性能

图 1 为不同纤维含量 BF/EP 复合材料的拉伸性能与弯曲性能曲线。由图可知,随着 BF 含量的增加,BF/EP 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量皆呈现出先提高后降低的趋势。图 1a 中,在 BF 质量分数从 45% 增至 55% 时,拉伸强度和拉伸弹性模量随之增加,且当 BF 质量分数为 55% 时,拉伸强度和拉伸弹性模量达到最大值,分别为 162 MPa 和 6.715 GPa。而当 BF 质量分数高于 55% 后,拉伸强度和拉伸弹性模量明显降低,在 85% 时的拉伸强度为 141 MPa,比最高点时降低了约 13%。图 1b 中,BF 质量分数从 45% 升至 65% 时,弯曲强度和弯曲弹性模量随之增加,当 BF 质量分数为 65% 时,弯曲强度和弯曲弹性模量达到最大值,分别为 272 MPa 和 30.245 GPa。当 BF 质量分数高于 65% 后,弯曲强度和弯曲弹性模量明显下降,在 85% 时的弯曲弹性模量为 25.729 GPa,比最高点时降低了约 15%。

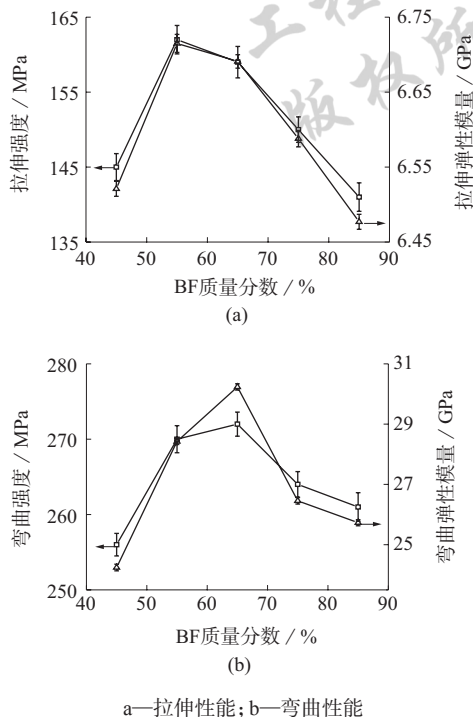


图 1 不同纤维含量 BF/EP 复合材料的拉伸性能和弯曲性能

图 2 为 BF 质量分数 45% 试件的拉伸断裂形貌 SEM 照片。如图 2 所示, BF 含量较低时, BF 在 EP 中分布均匀性较差,导致 BF/EP 复合材料体系

交联密度较小,从而容易造成共混中残余气体的产生以及复合材料出现裂纹、缝隙等缺陷,使得 BF 的增强效果一般。随着 BF 含量的增加,共混体系中的残余空气被逐渐排除,在 BF 与 EP 间形成紧密的物理结合,通过化学交联的作用, BF/EP 复合材料的交联密度得以增加,此时,复合材料的力学性能提高。随着 BF 含量继续增加, BF/EP 复合材料主要由 BF 受力, EP 本身的优点大大降低,且在热压工艺的过程中,容易使 BF 组织发生破坏,对复合材料的增强效果下降。

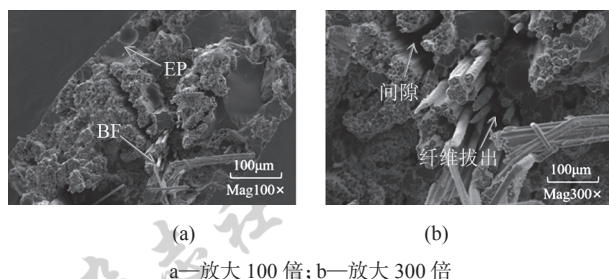


图 2 BF 质量分数 45% 试件的拉伸断裂形貌 SEM 照片

2.2 不同纤维含量 BF/EP 复合材料的吸水性能

BF 的含量既决定复合材料的密度,也影响着 BF 与 EP 的界面结合,对 BF/EP 复合材料吸水性的影响至关重要。BF/EP 复合材料的吸水途径主要有: EP 吸水、BF 吸水以及 BF 和 EP 的界面吸水^[16-17]。EP 因其具有疏水特性吸水率极低,而 BF 具有亲水特性其表面有大量的羟基,水分子与 BF 表面的羟基形成氢键,从而使得 BF 具有较强的吸水性^[18]。

图 3 为不同纤维含量时 BF/EP 复合材料的吸水率曲线。由图可知,随着 BF 含量的增加, BF/EP 复合材料的吸水率也随之增加,当 BF 质量分数从 45% 增至 65% 时,其吸水率增幅显著,由 25.3% 增至 30.1%,增加了约 19%;而 BF 质量分数超过 65% 时,其吸水率增幅逐渐趋于平缓,仅增加了约

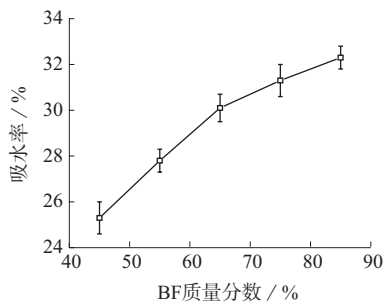


图 3 不同纤维含量 BF/EP 复合材料的吸水率

7%。图 4 为竹纤维的 SEM 照片,从图中可以看出,经过碾压法制得的竹原纤维其表面存有少量的薄壁细胞, BF 密度约为 1.49 g/cm^3 ^[19]。表 1 为不同纤维含量 BF/EP 复合材料的密度,由表 1 可知,EP 的密度为 1.16 g/cm^3 ,相对 BF 密度较低, BF 质量分数为 45% 时 BF/EP 复合材料的密度与 EP 相比反而略低,这是由于用热压法制备的过程中,45% 的 BF 含量较低,无法充分紧密地分布在 EP 基体内部,从而导致材料内部容易出现裂纹、气泡等缺陷,如图 2 所示。随着 BF 含量增加, BF/EP 复合材料的密度也随之增加,这是由于随着 BF 含量的继续增加,使得其逐渐充分均匀地分布在 EP 内,从而 BF/EP 复合材料内部的裂纹、气泡等缺陷逐渐消失、材料密度增大而更加紧实,其吸水率也逐渐趋于平缓。但由于 BF 的亲水性,其质量分数从 65% 增至 85% 时, BF/EP 复合材料的吸水率依然在小幅增加。

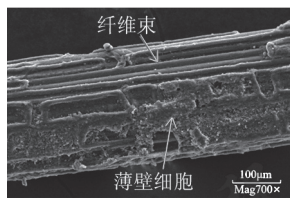


图 4 竹纤维 SEM 照片

表 1 不同纤维含量 BF/EP 复合材料的密度

项目	BF 质量分数 / %					
	0	45	55	65	75	85
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.16	1.051	1.164	1.215	1.248	1.273

2.3 不同板材厚度 BF/EP 复合材料的力学性能

由上述分析可知, BF 质量分数在 65% 时的综合性能相对较好,故控制 BF 质量分数在 65% 的情况下,制备厚度在 $0.6 \sim 1.4 \text{ mm}$ 的 BF/EP 复合板材。图 5 为不同板材厚度 BF/EP 复合材料的拉伸性能与弯曲性能曲线。由图可知,随着板材厚度增加,复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度和弯曲弹性模量皆呈现出上升的趋势。当板材厚度从 0.6 mm 增至 1.2 mm 时,复合材料的力学性能增幅显著,拉伸强度由 161 MPa 增至 193 MPa ,增加了约 20%,弯曲强度由 256 MPa 增至 276 MPa ,增加了约 8%;当板材厚度从 1.2 mm 增至 1.4 mm 时,复合材料的力学性能增幅有所减缓。这是由于在 BF 含量相同的情况下,材料密度基本保持不变,复合材料的力学性能仅受其材料厚度的影响,随着材料厚度的增加,其抗弯和抗拉截面随之增加,使得阻力增大从而力学性能得到提升;随着板材厚度的

继续增加,力学性能的增幅减缓,甚至会出现下降的趋势^[20]。笔者仅对轻薄型 BF/EP 复合板材进行分析说明,一定范围内 BF/EP 复合板材的力学性能与其厚度呈正相关。

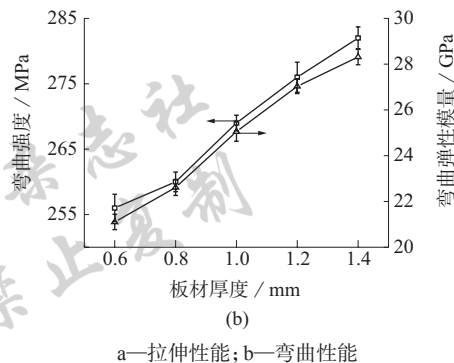
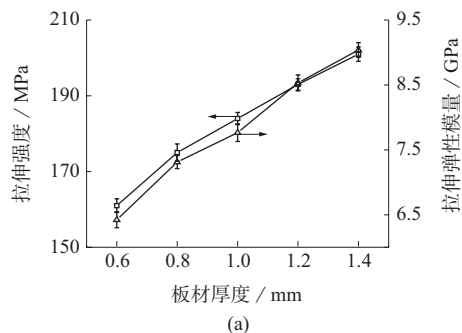


图 5 不同板材厚度 BF/EP 复合材料的拉伸性能和弯曲性能

2.4 不同板材厚度 BF/EP 复合材料的吸水性能

图 6 为不同板材厚度的吸水试样照片,图 7 为不同板材厚度时 BF/EP 复合材料的吸水率曲线。

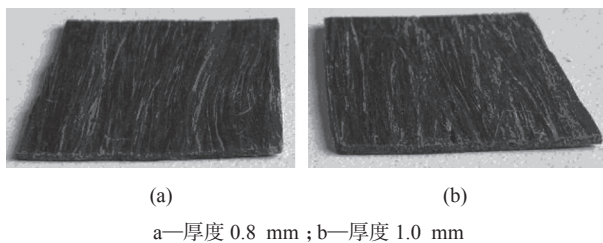


图 6 不同板材厚度吸水试样

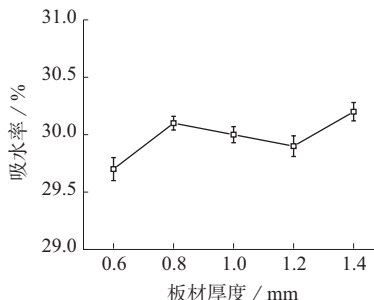


图 7 不同板材厚度 BF/EP 复合材料的吸水率

由图7可知,随着板材厚度的增加,BF/EP复合材料的吸水率围绕30%上下波动,没有明显的增加或降低趋势。这是由于随着板材厚度的增加,其表面积随之增加,在吸水性试验的过程中,随着BF/EP复合板材与水分子接触面积的增大,水分子进入BF与EP之间的间隙面积也随之增加,一部分水分子与EP中的极性基团结合,形成稳定的化学键以结合水的形式固定在复合材料中^[21],另一部分则被具有亲水性的BF吸收;但复合材料的吸水性与材料的表面积无关,而是与材料表面的孔隙率有关,而孔隙率又与材料密度相关,随着板材厚度的增加,不同板材厚度的BF/EP复合材料其BF含量相同、密度相同,尽管与水分子的接触面积增大,但其孔隙率并不会随着表面积的增加而增加,故其吸水性不受板材厚度的影响。

3 结论

(1) 随着BF含量的增加,使得共混体系中的残余空气被逐渐排除,在BF与EP间形成紧密的物理结合,提升了复合材料的力学性能;但BF含量过高时,容易使BF组织发生破坏,对复合材料的增强效果下降,BF质量分数在65%时复合板材力学性能最好。

(2) 随着BF含量的增加,BF/EP复合材料的吸水率随之增加,且BF质量分数在45%~65%时增加显著,BF质量分数超过65%时,其吸水率增势减缓。

(3) 在BF含量相同的情况下,一定范围内BF/EP复合板材的力学性能与其厚度成正相关;继续增加板材厚度,其力学性能增势减缓甚至可能出现降低趋势。

(4) 在BF含量相同的情况下,BF/EP复合板材由于其密度相同,随着板材厚度的增加,其吸水率没有明显的增加或降低趋势,与其厚度无关。

(5) 轻薄型BF/EP复合板材是一种质量轻、强度高、耐腐蚀性好、成本低且节能环保的天然纤维复合材料,可应用于室内装修、家具制造、轨道车辆、土木建筑等多个领域。

参考文献

- [1] Faruk O, Bledzki A K, Fink H P, et al. Progress report on natural fiber reinforced composites[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2014, 299(1).doi:10.1002 / mame.201300008.
- [2] Li Xue, Tabil L G, Panigrahi S. Chemical Treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites:A review[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, 15(1).doi:10.1007 / s10924-006-0042-3.
- [3] Joshi S V, Drzal L T, Mohanty A K, et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?[J]. *Composites Part A*, 2003, 35(3).doi:10.1016 / j.compositesa.2003.09.016.
- [4] 梁春群,莫攸. 竹纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能研究[J]. *化工技术与开发*, 2010, 39(8):23-26.
Liang Chunqun, Mo You. Mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy resin composites[J]. *Chemical Technology and Development*, 2010, 39(8):23-26.
- [5] Liese W. Research on bamboo[J]. *Wood Science and Technology*, 1987, 21(3).doi:10.1007 / BF00351391.
- [6] Dixon P G, Gibson L J. The structure and mechanics of Moso bamboo material[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2014, 11(99).doi:10.1098 / rsif.2014.0321.
- [7] 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):2561-2567.
Tang Qiheng, Cheng Haitao, Wang Ge, et al. Effect of bamboo fiber combination on properties of bamboo fiber / polypropylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(11):2561-2567.
- [8] Abdul Khalil H P S, Bhat I U H, Jawaid M, et al. Bamboo fibre reinforced biocomposites:A review[J]. *Materials and Design*, 2012, 42.doi:10.1016 / j.matdes.2012.06.015.
- [9] Depuydt D E C, Sweygers N, Appels L, et al. Bamboo fibres sourced from three global locations:A microstructural, mechanical and chemical composition study[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(9).doi:10.1177 / 0731684419828532.
- [10] 姚开泰,谭伟,周海洋,等. 竹龄和竹秆纵向部位对青皮竹物理力学性能的影响[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(5):76-81.
Yao Kaitai, Tan Wei, Zhou Haiyang, et al. Effects of bamboo age and longitudinal part of bamboo stalk on physical and mechanical properties of green bark bamboo[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(5):76-81.
- [11] 苏航,郑水蓉,孙曼灵,等. 纤维增强环氧树脂基复合材料的研究进展[J]. *热固性树脂*, 2011, 26(4):54-57.
Su Hang, Zheng Shuirong, Sun Manling, et al. Research progress of fiber reinforced epoxy resin matrix composites[J]. *Thermosetting Resin*, 2011, 26(4):54-57.
- [12] 张宝华,叶俊丹,陈斌,等. 固化温度对环氧树脂固化物性能的影响[J]. *塑料工业*, 2009, 37(9):64-66, 79.

- Zhang Baohua, Ye Jundan, Chen Bin, et al. Effect of curing temperature on properties of epoxy resin cured products [J]. China Plastics Industry, 2009, 37(9):64–66, 79.
- [13] 张文福,程海涛,王戈,等. 竹纤维环氧树脂复合材料孔隙特征及其表征方法 [J]. 世界林业研究, 2019, 32(3):55–60.
- Zhang Wenfu, Cheng Haitao, Wang Ge, et al. Pore characteristics and characterization methods of bamboo fiber epoxy resin composites[J]. World Forestry Research, 2019, 32(3):55–60.
- [14] 施江靖,陈红,张文福,等. 纤维含量对 VARTM 制备竹纤维/环氧树脂复合材料性能影响 [J/OL]. 复合材料学报, 2021:1–10[2021-09-26]. <https://fhclxb.buaa.edu.cn/cn/article/id/4283c4e0-1f4a-487e-bf63-15534b1a12a7>.
- Shi Jiangjing, Chen Hong, Zhang Wenfu, et al. Effect of fiber content on properties of bamboo fiber / epoxy resin composites prepared by VARTM [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021:1–10[2021-09-26]. <https://fhclxb.buaa.edu.cn/cn/article/id/4283c4e0-1f4a-487e-bf63-15534b1a12a7>.
- [15] Zhang Kai, Wang Fangxin, Liang Wenyan, et al. Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy composites[J]. Polymers, 2018, 10(6).doi:10.3390/polym10060608.
- [16] Ishikawa H, Takagi H, Antonio, et al. Effect of surface treatments on the mechanical properties of natural fiber textile composites made by VaRTM method[J]. Composite Interfaces, 2014, 21(4). doi:10.1080 / 15685543.2013.876322.
- [17] Gupta A. Synthesis, chemical resistance, and water absorption of bamboo fiber reinforced epoxy composites[J]. Polymer Composites, 2016, 37(1).doi:10.1002 / pc.23164.
- [18] Kim H, Okubo K, Fujii T, et al. Influence of fiber extraction and surface modification on mechanical properties of green composites with bamboo fiber[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(12).doi:10.1080 / 01694243.2012.697363.
- [19] 孙中伟,杨建平,郁崇文. 竹原纤维的密度测试 [J]. 纺织科技进展, 2007(1):75–76.
- Sun Zhongwei, Yang Jianping, Yu Chongwen. Density test of bamboo raw fiber[J]. Progress of Textile Science and Technology, 2007(1):75–76.
- [20] 孙正军,程强,江泽慧. 竹丝/环氧复合材料力学性能 [J]. 航空制造技术, 2008(6):89–91.
- Sun Zhengjun, Cheng Qiang, Jiang Zehui. Mechanical properties of bamboo wire / epoxy composites[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2008(6):89–91.
- [21] 陈晨阳,李仙会,马颖琦,等. 环氧树脂及环氧树脂基固体浮力材料吸水性研究进展 [J]. 理化检验 (物理分册), 2018, 54(3):157–161.
- Chen Chenyang, Li Xianhui, Ma Yingqi, et al. Research progress on water absorption of epoxy resin and epoxy resin based solid buoyant materials[J]. Physical and Chemical Inspection (physical volume), 2018, 54(3):157–161.