

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.003

环氧树脂/竹纤维复合材料性能

付常青, 燕韵天, 常旬, 孙呵, 陈太安

(西南林业大学, 材料与化学工程学院, 昆明 650224)

摘要: 为探究不同长度及含量的竹纤维(BF)制备复合材料的性能差异,采用碱/KH550对BF进行表面改性后,剪裁成长纤维(LBF)、短纤维(SBF)两种不同长度的BF,通过编织-模压工艺制备BF质量分数分别为25%,35%,45%的BF增强环氧树脂(EP/BF)复合材料,使用傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜(SEM)、动态力学、力学试验机对改性前后BF的性能和复合材料性能进行表征。结果表明,碱/KH550改性处理对BF的化学组分有所影响;EP/LBF复合材料的力学性能和黏弹性都优于EP/SBF复合材料,EP/LBF复合材料中的LBF质量分数从25%增至45%时,力学性能呈递增趋势,当BF质量分数为45%时,EP/LBF复合材料的拉伸强度、弯曲强度分别为100,121.34 MPa,而在SBF质量分数为35%时EP/SBF复合材料的力学性能达到相对最优值,拉伸强度、弯曲强度分别为47.34,73.29 MPa;SEM显示了LBF整体分布较为整齐有序,SBF杂乱无序,且LBF的拉伸断裂时抽拔现象没有SBF明显。

关键词: 长竹纤维;短竹纤维;环氧树脂;力学性能;微观形貌

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0013-07

Properties of Epoxy/Bamboo Fiber Composites

Fu Changqing, Yan Yuntian, Chang Xun, Sun He, Chen Taian

(Southwest Forestry University, College of Materials Science and Chemical Engineering, Kunming 650224, China)

Abstract : To investigate the performance differences of bamboo fiber (BF) reinforced epoxy (EP) composite materials made with BF of different lengths and contents, BF were treated with alkali/KH550 for surface modification, and then cut into two different lengths of fibers, long bamboo fiber (LBF) and short bamboo fiber (SBF). Composites with fiber contents of 25%, 35%, and 45% were prepared using a weaving-molding process. The properties of the composites with the unmodified and modified BF were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscope (SEM), dynamic mechanical analyzer, and a mechanical testing machine. The results show that the alkali/KH550 treatment affects the chemical composition of the BF. The mechanical and viscoelastic properties of EP/LBF composites are superior to those of EP/SBF composites. When the fiber content in EP/LBF composite increases from 25% to 45%, the mechanical properties shows an increasing trend. When the LBF content is 45%, the tensile and flexural strengths of EP/BF composite are 100 MPa and 121.34 MPa, respectively. In contrast, the mechanical properties of EP/SBF composites reach a relative optimum at a fiber content of 35%, with tensile and flexural strengths of 47.34 MPa and 73.29 MPa, respectively. SEM shows that LBF are more orderly distributed than SBF, and the phenomenon of fiber pull-out is less obvious in long fiber fracture.

Keywords: long bamboo fiber; short bamboo fiber; epoxy; mechanical property; microstructure

随着人们对生活方式轻便化、高效化的追求,石油基塑料应用在人类日常生活中的各个领域。但是石油资源的逐渐减少和塑料污染问题的日益加剧,使得人们不得不寻求一种新的材料来替代石

油基塑料产品。天然纤维增强复合材料具有质量轻、能耗低、强度高、可生物降解等特性^[1-3],应用生活中的许多领域,充分发挥了高效、无污染等特点。因此开发和研制低成本、高性能且环境友好型

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFD0600202)

通信作者: 陈太安,博士,教授,主要从事木材改性干燥方面的研究

收稿日期: 2023-05-24

引用格式: 付常青,燕韵天,常旬,等. 环氧树脂/竹纤维复合材料性能[J]. 工程塑料应用,2023,51(7):13-19.

Fu Changqing, Yan Yuntian, Chang Xun, et al. Properties of epoxy/bamboo fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7):13-19.

复合材料成为了复合材料研究领域的重点^[4]。

竹纤维(BF)不仅具有优异的力学性能,而且取材方便,资源丰富,被广泛应用于天然纤维增强复合材料的制备^[5]。但是,BF中存在大量的羟基,是亲水性材料,与疏水性的聚合物界面结合较差,导致载荷在界面中无法实现高效的传递,严重影响了复合材料的综合性能^[6-7]。为了改善其界面相容性,需要对BF表面进行改性处理。Borchani等^[8]对天然BF进行不同浓度碱处理,发现竹纤维素含量和结晶度都有所提高,表明碱处理能够提高BF的强度。Salim等^[9]发现使用碱处理增加了BF的表面能,使BF拥有更好的润湿性和相容性。王正^[10]发现碱处理后增加了BF表面的粗糙度,为基体提供了更多的结合/反应位点,有利于增强纤维和树脂界面间的渗透作用以及界面机械互锁。Jin等^[11]采用不同的偶联剂改性BF,发现偶联剂处理提高了复合材料的结晶度,其中硅烷偶联剂的效果最好。Xie等^[12]和Ma等^[13]对BF进行硅烷偶联剂处理后,得出硅烷偶联剂一侧的Si—O—C键和纤维素中的氢键发生反应,另一侧有机官能团与树脂反应生成,从而使BF与环氧树脂(EP)界面之间形成偶联,提高其综合性能。

BF的长度是影响复合材料性能的重要因素,对纤维增强复合材料施加载荷,剪切应力从复合材料表面进入到内部并沿着纤维-基质界面转移到纤维上,转移的效率随着纤维的长径比(L/D)的增加而增加^[14-15]。笔者以EP为基体,BF为增强材料,采用NaOH和硅烷偶联剂作为改性剂,制备EP/BF复合材料,分析EP/长竹纤维(LBF)复合材料与EP/短竹纤维(SBF)复合材料的性能差异,对LBF在EP/LBF复合材料方面的应用提供一些基础数据及理论支持。

1 实验部分

1.1 原材料

BF:两年生慈竹,长度300 mm,直径270~350 μm ,市购;

EP:HZ-01AB,昆山北亚化工有限公司;

消泡剂:AFE300,上海汇志达科技有限公司;

NaOH:96%,四川西陇科学有限公司;

硅烷偶联剂:KH550,98%,上海源叶生物科技有限公司;

无水乙醇:纯度99.7%,广东光华科技股份有限

公司;

冰乙酸:纯度99.5%,四川西陇科学有限公司;

丙酮:纯度99.5%,云南滇滇药业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50型,美国Thermo Fisher公司;

扫描电子显微镜(SEM):FEIQuanta-200型,荷兰FEI有限公司;

万能力学试验机:UTM4000型,深圳三思纵横有限公司;

动态力学(DMA)分析仪:DMA242C型,德国NETZSCH公司;

双层平板热压机:XLB-Q600×600型,青岛华博机械科技公司。

1.3 试样制备

(1)碱/KH550改性BF制备。

将BF放置于盛放有质量分数为4%的NaOH溶液的玻璃器皿中(固液比1:10),在常温下浸泡处理12 h,每间隔2 h搅拌一次,使竹纤维充分接触碱溶液。然后使用蒸馏水洗至中性,放置在80℃鼓风干燥箱中干燥12 h,得到碱处理的原竹纤维。配置质量分数为2%的硅烷偶联剂溶液(无水乙醇:蒸馏水:KH550=50:50:1),用冰乙酸调溶液pH值至3.5~4.5。将碱处理的BF和配置的溶液放置在玻璃器皿中,浸泡2 h,每间隔20 min搅拌一次。然后放置在80℃鼓风干燥箱中干燥12 h,得到碱/KH550改性处理的BF,装袋放置在干燥皿中备用。

(2)EP/BF复合材料制备。

按照BF质量分数为25%,35%,45%的比例分别制备LBF,SBF增强EP复合材料。根据BF的质量比配置定量的混合胶(EP:固化剂:消泡剂=200:100:1),搅拌均匀,随后与放置在模具中的BF均匀混合,合上模具,放置在80℃的热压机上压制30 min,待模具冷却后,取出样板(100 mm×100 mm×4 mm),放置在80℃的鼓风干燥箱中4 h,使其完全固化。装袋放置在干燥皿中以备后续测试使用。EP/LBF复合材料、EP/SBF复合材料后期压制过程相同,前期制备过程中的区别如下:

EP/LBF复合材料制备。将改性完成的BF修剪至长度为100 mm,为了能够在模具中均匀分布,编织成单向排列的纤维毡,放置于103℃的鼓风干燥箱中2 h烘至绝干,取出后按照每层相互垂直的排

列方式铺设于模具中,LBF铺装示意图如图1所示。均匀涂刷混合胶,压制成型。

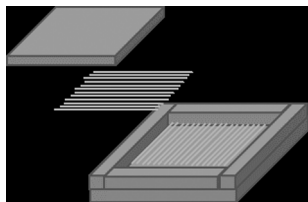


图1 LBF铺装示意图

EP/SBF复合材料制备。将改性完成的BF修剪至5~7 mm长度,放置于103 °C的鼓风干燥箱中2 h烘干,取出后均匀铺装于模具中,SBF铺装示意图如图2所示。均匀施加混合胶,压制成型。

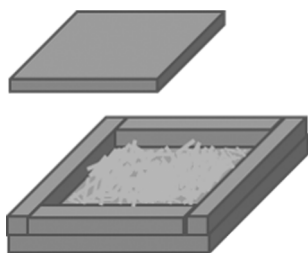


图2 SBF铺装示意图

1.4 性能测试及表征

FTIR 测试:改性前后的BF干燥至绝干后使用粉碎机打碎,使用筛子筛出0.24 mm大小的试样,溴化钾压片,波数范围为400~4 000 cm^{-1} ,分辨率为4 cm^{-1} ,扫描次数为32次;

SEM 分析:将经过拉伸测试后的试样,保留断裂面,切割成5 mm×5 mm×4 mm,断面镀金,观察断面微观形貌;

DMA 分析:将试样切割成50 mm×10 mm×4 mm,放置于炉腔内,起始温度25 °C,调整频率1.0 Hz,升温速率为3 °C/min,动态频率5 Hz,终止温度140 °C。

拉伸强度按 GB/T 1447-2005 测试。取哑铃形试样,试样尺寸为100 mm×20 mm×4 mm,每组试样为5个,夹头向上的加载速度是5 mm/min。

弯曲强度按 GB/T 1449-2005 测试,用万能力学试验机测试。试样尺寸为80 mm×15 mm×4 mm,每组试样为5个,加载辊向下的加载速度是2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

图3为未改性和碱/KH550改性处理BF的FTIR谱图。由图3可见,BF在3 380 cm^{-1} 处和2 890 cm^{-1}

处振动强烈,分别代表—OH的伸缩振动吸收峰和—CH₃、—CH₂对称与不对称伸缩振动吸收峰,这是纤维素物质的特征性谱带,同时表明了碱/KH550改性处理不会改变竹纤维的主要骨架结构^[16]。在1 737 cm^{-1} 处吸收峰为半纤维素和果胶中乙酰基中的C=O伸缩振动峰,对比未处理材料,此处吸收峰的消失说明碱处理可以去除BF表面的半纤维素和果胶等物质。1 242 cm^{-1} 处是木质素类物质的特征吸收峰,改性处理后吸收峰明显减弱,表明改性处理可以减少竹纤维中木质素的含量^[17-18]。综上所述可知,碱/KH550改性处理BF可以有效地去除BF表面的半纤维素、木质素和果胶等杂质,使BF表面变得粗糙和提高纤维素相对含量,从而为基体提供更多的结合位点,同时偶联剂作为纤维和树脂的桥带,极性一端与纤维表面的羟基反应生成氢键,非极性一端与树脂基体发生化学作用,交联缠结在一起,界面结合增强,使分子内部作用力增加,有效提高复合材料的力学性能。

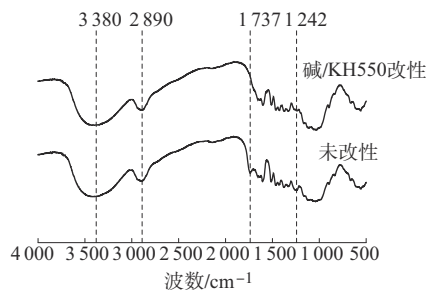


图3 改性前后原BF的FTIR谱图

2.2 力学性能分析

影响EP/BF复合材料力学性能的因素,除BF与树脂的界面结合性能外,BF的长度和含量也是影响其力学性能的重要因素。图4为EP/LBF,EP/SBF复合材料的力学性能。由图4可以明显看出,当EP/BF复合材料中的BF含量相同时,EP/LBF复合材料的拉伸强度及弯曲强度明显优于EP/SBF复合材料,且在BF质量分数由25%增加到45%时,EP/LBF复合材料的拉伸强度和弯曲强度呈递增趋势,而EP/SBF复合材料呈先上升后下降的趋势。EP/SBF复合材料在BF质量分数为35%时的拉伸强度和弯曲强度达到最大值,分别为47.34、73.29 MPa,对比同等含量EP/LBF复合材料的拉伸强度(82.80 MPa)和弯曲强度(97.35 MPa),分别降低了42.82%和24.71%。在BF质量分数达到45%时,EP/SBF复合材料相比于EP/LBF复合材料的拉伸强度和弯曲强度差距最为明显,分别降低了146.4%和80.3%。

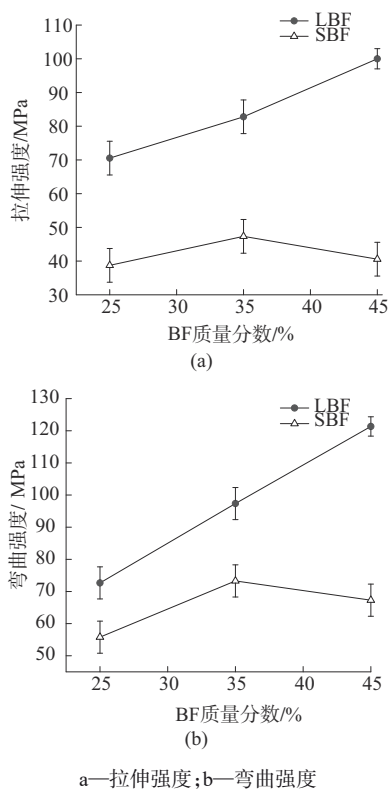


图4 EP/LBF, EP/SBF复合材料的力学性能

分析EP/LBF, EP/SBF复合材料力学性能差异较大的主要原因为, SBF是杂乱无序分布的, 纤维与纤维之间不具有连续性, 在受到外部载荷时, 不能形成良好的纤维-树脂-纤维的传递模式。而LBF因其是一个连续的整体, 纤维排列整齐有序, 则能构成良好的传递模式。随着BF含量的增加, 树脂的相对含量越来越少, 树脂对纤维的包覆层变薄, 从而当BF质量分数由35%增至45%时, EP/SBF复合材料的力学性能下降; EP/LBF复合材料的力学性能不降反升的原因是, LBF在此含量时, 纤维的连续性以及顺纹有序的排列方式对其力学性能的影响要大于纤维含量的影响。

2.3 SEM分析

图5是不同BF含量的EP/LBF, EP/SBF复合材料拉伸断面SEM图。其显示了EP/BF复合材料拉伸断裂断口形貌及竹纤维的排列分布情况。由图5可以明显看出, LBF整体分布比较均匀且排列规则有序, SBF的分布存在稀疏差异且排列杂乱无序, 且EP/LBF复合材料的断面相对于EP/SBF复合材料更为平整。因为LBF的均匀有序排列, EP/LBF复合材料整体力学性能更加稳定, 在受到外部载荷时, 能够有效的传导, 无论是在纵向还是横向, 呈现的力学效果近乎相同, 且不会因为生产板材的面积

增大, 造成局部区域的力学性能不稳定性。而EP/SBF复合材料则不然, 因为SBF的排列无序, 在各个方向上呈现各向异性, 在受到外部载荷时, 不能有效的传导, 在整体稳定性方面略有不足, 可能会导致部分区域力学性能比较好, 部分区域的效果却差, 特别是当制作的复合板材较大时, 这种力学性能的不均匀性尤为明显, 在实际应用过程中具有较大安全隐患。

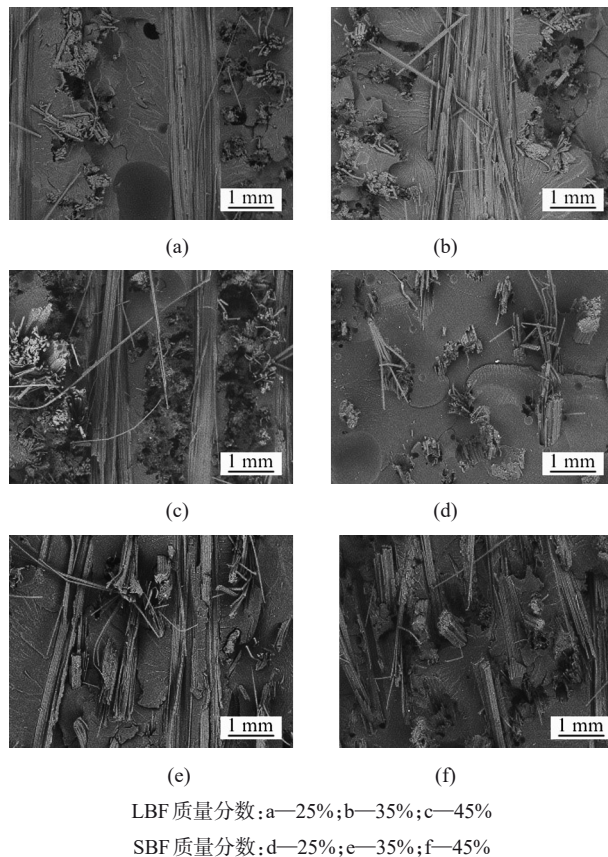
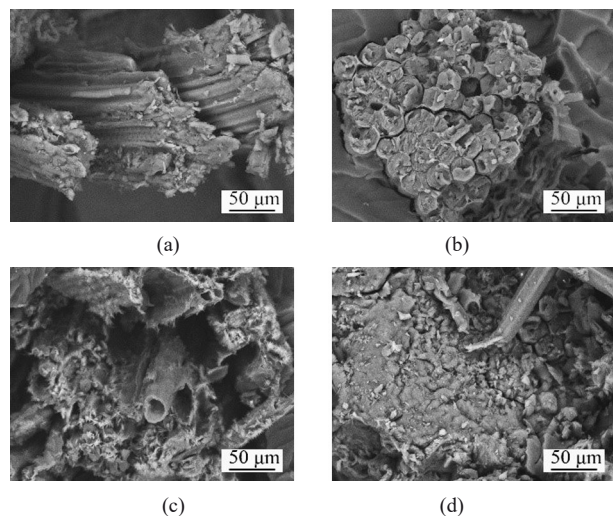


图5 EP/LBF, EP/SBF复合材料拉伸断面的SEM图(放大100倍)

图6是BF质量分数为35%和45%的EP/LBF, EP/SBF复合材料拉伸断面SEM图。其显示了EP/BF复合材料中BF与EP的结合情况以及EP对BF的浸润程度。图6a和图6c可以看出, EP/SBF复合材料在SBF的质量分数为35%时, EP充分地浸润了SBF, 并且在拉伸断裂时, 呈整体抽拔现象, 拔出的部分纤维-树脂-纤维之间结合也较为紧密。而在当SBF质量分数为45%时, SBF整体上得到了较好的浸润, 但是存在部分BF没有得到浸润, BF内部中空现象较为明显, 并且纤维被分散拔出, 呈现不规则形状。这说明了EP/SBF复合材料中的SBF质量分数从35%增加到45%时, 力学性能下降的原因。由图6b和图6d可以看出, EP/LBF复合材料的LBF质

量分数从35%增至45%时,LBF仍然被EP充分浸润,LBF和EP在同一处断裂,断口比较整齐,没有较明显的抽拔现象,纤维仍起到良好的应力传递效果,由此EP/LBF复合材料在LBF质量分数从35%增加到45%时,力学性能仍呈上升趋势。对比图6c和图6d,在LBF含量相同时,LBF得到了充分浸润而SBF没有得到充分浸润,其原因是,SBF分布相对LBF来说可能不够均匀,在均匀施胶的情况下,呈现出SBF部分区域胶贫现象。这也是EP/SBF复合材料在SBF质量分数从35%增加到45%时力学性能降低而EP/LBF复合材料力学性能没有降低的又一原因。

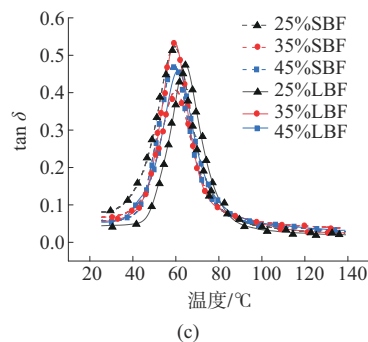
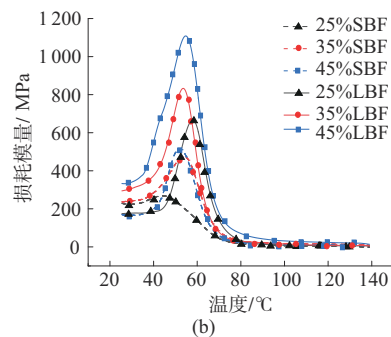
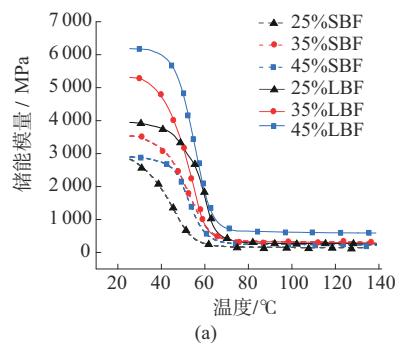


a—35%SBF;b—35%LBF;c—45%SBF;d—45%LBF
图6 质量分数35%,45%的EP/LBF,EP/SBF复合材料
拉伸断面SEM图(放大1500倍)

2.4 DMA分析

储能模量表示材料弹性大小,损耗模量表示材料黏性大小,损耗因子($\tan \delta$)是对材料能量耗散的测量^[19-20]。图7为EP/BF复合材料DMA性能。由图7a可看出,随着温度的升高,EP/LBF,EP/SBF复合材料的储能模量都呈现下降趋势,且EP/LBF复合材料的储能模量要远高于EP/SBF复合材料的储能模量。其中,在BF含量相同时,EP/LBF复合材料的储能模量相对于EP/SBF复合材料提升最大的是在BF质量分数为45%时,此时EP/SBF复合材料的最大储能模量是2 895 MPa,EP/LBF复合材料的最大储能模量是6 185 MPa,提高了113.6%,在质量分数为25%,35%时也分别提高了39.4%,50.4%。说明了BF长度的增加,增强了BF和EP间的相互作用,形成了稳定机械互锁复合结构,从而使相同纤维含

量下EP/LBF复合材料的储能模量远高于EP/SBF复合材料。BF质量分数为25%的EP/LBF复合材料的储能模量比三种BF含量的EP/SBF复合材料的储能模量都要高,表明在BF质量分数为25%~45%时,BF的长度对储能模量的影响要大于BF含量对储能模量的影响。EP/SBF复合材料中的SBF质量分数从35%增加至45%时,最高储能模量从3 529 MPa下降到2 895 MPa,降低了21.9%,与拉伸强度、弯曲强度下降结果相对应。储能模量是对复合材料微观结构的敏感反应,是复合材料刚度和拉伸弹性模量的体现,材料的储能模量越大,刚性越大,材料也越不容易变形。在较低温度时,复合材料发生玻璃化转变之前,材料内部分子链不易发生相对运动,材料刚性较大,有较高的储能模量。随着温度的升高,材料内部的分子链运动剧烈,刚性降低,较易变形,储能模量迅速降低^[21]。



a—储能模量;b—损耗模量;c— $\tan \delta$
图7 EP/BF复合材料DMA性能

图7b显示了20~140℃全部EP/BF复合材料的损耗模量与温度的关系曲线图。损耗模量是材料分散储存能量的能力,它描述了材料的黏性以及不同分子运动类型、形态、跃迁弛豫过程和结构异质性^[22]。从图7b可以观察到,随着BF含量的增加,损耗模量逐渐提高,而且EP/LBF复合材料的损耗模量全部都高于EP/SBF复合材料。这表明随着BF含量的增加,BF与EP的相互作用更大,分子链显现出更多的摩擦运动,因此会放出更多的运动热能,呈现出更大的损耗模量,同时也表明在BF质量分数为25%~45%时,BF长度对损耗模量的影响要大于BF含量对其的影响。LBF相比于SBF在纤维与纤维之间会有更强的协同作用,因此会有更好的界面结合效果,不会出现界面断层,从而表现出更高的损耗模量。

$\tan \delta$ 是损耗模量与储能模量之比,是引入黏弹性和阻尼能力的重要因素^[23]。由图7c可以看出,EP/BF复合材料在LBF质量分数35%和SBF质量分数25%时 $\tan \delta$ 较大(0.54,0.52),SBF质量分数为35%时 $\tan \delta$ 最小(0.40),LBF质量分数为25%,45%和SBF质量分数为45%时 $\tan \delta$ 则相差不大(0.48,0.46,0.48)。 $\tan \delta$ 随着温度的升高而逐渐增大,在过渡区域达到最大值,然后随着温度的继续升高而快速降低,在缓慢降低直至无限趋近于0。玻璃化转变温度在曲线峰值处确定,且随着BF含量和长度的改变,玻璃化转变温度并没有随之改变,都在60℃左右,说明了纤维长度和含量对EP/BF复合材料的玻璃化转变温度影响很小。

3 结论

(1) EP/LBF复合材料比EP/SBF复合材料具有更好的力学性能,在BF质量分数从25%增至45%时,EP/LBF复合材料力学性能呈递增趋势,当BF质量分数为45%时,拉伸强度、弯曲强度分别为100,121.34 MPa,而EP/SBF复合材料力学性能先上升后下降,当BF质量分数为35%时达到最大值,拉伸强度、弯曲强度分别为47.34,73.29 MPa。

(2) EP/LBF复合材料较EP/SBF复合材料具有更为优良的黏弹性能,EP/LBF复合材料的任一纤维含量的储能模量和损耗模量均大于EP/SBF复合材料,表明了BF质量分数为25%~45%时,BF的长度对储能模量和损耗模量的影响大于纤维含量的影响。

(3) EP/BF复合材料的拉伸断面SEM图显示了LBF排列更为整齐有序,断面平整,而SBF排列杂乱无序,抽拔现象较为明显。在BF质量分数为45%时,LBF比SBF有更好的浸润效果。

参考文献

- [1] Sapuan S M, Aulia H S, Ilyas R A, et al. Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites[J]. *Polymers*, 2020, 12(10). DOI: 10.3390/polym12102211.
- [2] Syafiq R, Sapuan S M, Zuhri M R M. Antimicrobial activity, physical, mechanical and barrier properties of sugar palm based nanocellulose/starch biocomposite films incorporated with cinnamon essential oil[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021(11):144–157.
- [3] Saba N, Jawaid M, Alothman O Y, et al. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(6):447–470.
- [4] 江泽慧,孙正军,任海青.先进生物复合材料在风电叶片中的应用[J].*复合材料学报*,2006,23(3):131–133.
Jiang Zehui, Sun Zhengjun, Ren Haiqing. Application of advanced bio-composites in wind blades[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(3):131–133.
- [5] Das M, Chakraborty D. Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 107(1):522–527.
- [6] Panaitescu D M, Nicolae C A, Vuluga Z, et al. Influence of hemp fibers with modified surface on polypropylene composites[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016(37): 137–146.
- [7] Chen H, Zhang W, Wang X, 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.
- [8] Borchani K E, Carrot C, Jaziri M. Untreated and alkali treated fibers from Alfa stem:Effect of alkali treatment on structural, morphological and thermal features[J]. *Cellulose*, 2015, 22(3):1 577–1 589.
- [9] Salim S, Rihayat T, Riskina S, et al. Physical and mechanical properties of bamboo/flax fibre reinforced epoxy composite water absorption behaviour and high-temperature conditions[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2021, 50(8): 415–424.
- [10] 王正.木塑复合材料界面特性及其影响因子的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2001.
Wang Zheng. The interface characteristics and influencing factors of wood plastic composite materials[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2001.
- [11] Jin X, Zhang X, Xu C, et al. Effect of bamboo fibers with different coupling agents on the properties of poly (hydroxybutyrate-co-valerate) biocomposites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,

- 2019, 136(20).DOI: 10.1002/app.47533.
- [12] Xie Y, Hill C A S, Xiao Z, et al. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(7):806–819.
- [13] Ma Y, Qian S, Hu L, et al. Mechanical, thermal, and morphological properties of PLA biocomposites toughened with silylated bamboo cellulose nanowhiskers[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(8):3 012–3 019.
- [14] 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.
- [15] Hao J, Yi X, Zong G, et al. Fabrication of long bamboo fiber-reinforced thermoplastic composite by extrusion and improvement of its properties[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021 (173).DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114120.
- [16] Wu Q, Chi K, Wu Y, et al. Mechanical, thermal expansion, and flammability properties of co-extruded wood polymer composites with basalt fiber reinforced shells[J]. *Materials & Design*, 2014 (60):334–342.
- [17] 毛海良, 盛奎川, 陆军, 等. 竹纤维碱处理及其增强聚乳酸基复合材料性能表征[C]//第 17 届全国复合材料学术会议. 北京: 北京中航时代文化传播有限公司, 2012:49–52.
- Mao Hailiang, Sheng Kuichuan, Lu Jun, et al. Effects of Alkali Treatment on the Properties of Bamboo Fibre/Poly(lactic acid) Eco-Composites[C]//Paper of the 17th National Academic Conference on Composite Materials. Beijing: Beijing AVic Times Culture Communication Co. Ltd., 2012:49–52.
- [18] Goriparthi B K, Suman K N S, Rao N M. Effect of fiber surface treatments on mechanical and abrasive wear performance of polylactide/jute composites[J]. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2012, 43(10):1 800–1 808.
- [19] Gheith M H, Aziz M A, Ghori W, et al. Flexural, thermal and dynamic mechanical properties of date palm fibres reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(1):853–860.
- [20] Md Shah A U, Sultan M T H, Jawaid M. Sandwich-structured bamboo powder/glass fibre-reinforced epoxy hybrid composites – Mechanical performance in static and dynamic evaluations[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2021, 23(1):47–64.
- [21] 张庆法, 徐航, 任夏瑾, 等. 农林废物生物炭/高密度聚乙烯复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2):398–405.
- Zhang Qingfa, Xu Hang, Ren Xiajin, et al. Preparation and properties of agroforestry wastes biochar/high density polyethylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 398–405.
- [22] Negawo T A, Polat Y, Akgul Y, et al. Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites[J]. *Composite Structures*, 2021(259). DOI:10.1016/j.compstruct.2020.113221.
- [23] Jawaid M, Awad S, Fouad H, et al. Improvements in the thermal behaviour of date palm/bamboo fibres reinforced epoxy hybrid composites[J]. *Composite Structures*, 2021(277). DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114644.