

# 利乐纤维/竹纤维复合材料的制备与性能研究

于涵<sup>1</sup>, 郭辉<sup>1</sup>, 农金林<sup>1</sup>, 何云科<sup>1</sup>, 于丽丽<sup>1</sup>, 宋鲲<sup>2</sup>

(1.天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2.浙江大胜达包装股份有限公司, 杭州 311215)

**摘要:**为促进废弃利乐包的回收利用,降低废弃利乐包装材料对环境的危害,研究了将废弃利乐包粉碎后的纤维(简称利乐纤维,TPF)、竹纤维(BF)与酚醛树脂复合,制备具有实际应用价值的TPF复合材料。采用单因素实验分析了各热压工艺参数对复合材料力学性能的影响,并采用正交实验对热压工艺参数进行优化;在此基础上,采用竹粉对TPF复合材料进行改性,得到了TPF/BF复合材料。结果表明:TPF复合材料的弹性模量及静曲强度均随热压温度、热压时间、热压压力、施胶量等工艺参数的增加,呈现先增加后降低的趋势;热压温度对复合材料力学性能的影响最大,而施胶量则是影响复合材料尺寸稳定性的关键因素。制备TPF复合材料的最佳工艺为热压温度170℃、热压时间14 min、热压压力1.2 MPa、施胶量16%。在此工艺条件下,利用竹纤维代替10%的利乐纤维,可以确保制得的TPF/BF复合材料各项性能均满足GB/T 11718—2021《中密度纤维板》对不同应用领域要求。

**关键词:**利乐纤维;竹纤维;热压工艺参数;力学性能;尺寸稳定性

利乐(Tetra Pak)包装是一种由纸板、聚乙烯和铝箔等多层材料复合而成的复合纸质包装,被广泛应用于牛奶、果汁、饮料等诸多行业。然而,随着利乐包装的广泛使用,全球每年都面临着大量利乐包装废弃的问题。目前,废弃利乐包装回收难度较大,在我国其回收率不足20%,不能回收的废弃利乐包装不仅会带来巨大的资源浪费,而且会对环境造成危害。据统计,2022年利乐公司共售出1930亿个饮料纸基复合包装,仅有约500亿个被回收<sup>[1]</sup>。研究表明<sup>[2-3]</sup>,利乐包装直接丢弃会成为自然环境中难以降解的污染源,污染土壤和地下水等,通过焚烧或填埋等方式处理也会带来对环境和人体健康的危害。

我国针对废弃利乐包装等制定回收利用制度起步较晚,2020年国家发展改革委等部门发布了《饮料纸基复合包装生产者责任延伸制度实施方

案》,目标是到2025年废弃饮料纸基复合包装的资源化利用率力争达到40%<sup>[4]</sup>。目前,国际上对于废弃利乐包装的回收技术主要包括整体利用和分离使用两类。整体利用技术是将废弃利乐包装进行整体回收再利用,或利用其破碎处理后的利乐纤维(Tetra Pak fiber, TPF)制备再生复合材料。VALDES-RODRIGUEZ等<sup>[5]</sup>使用稀硫酸对利乐包装的残渣进行水热炭化,制备出的水热炭可以有效净化被重金属离子污染的水体。BUONOCORE等<sup>[6]</sup>研究了一种不使用其他化学试剂和黏合剂的热处理方法,并使用该种热方法从回收的利乐包装中获得多层片材,从而制备隔热板。BAL<sup>[7]</sup>使用回收的聚乙烯、利乐纤维和松木粉混合作为填料生产出性能符合要求的木塑复合材料,证明利乐纤维可以在木塑复合材料的生产中代替木粉作为填料。EBADI等<sup>[8-9]</sup>研究了利乐纤维和马来酸酐接枝聚乙烯对木

基金项目:天津市级大学生创新创业训练计划项目(202410057028)  
通信作者:于丽丽,副教授,yulilucky@tust.edu.cn。

塑性复合材料物理力学性能的影响。结果表明:含30%利乐纤维和3%马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)的木塑复合材料,其拉伸强度、拉伸模量和抗冲击性最高。在加入利乐纤维和MAPE后,木塑复合材料的抗弯强度和弹性模量得到明显提高,且24 h吸水率和厚度膨胀率明显降低。

分离使用技术是将废弃利乐包装中的纸纤维、塑料及铝箔分别进行剥离再利用。ZÚÑIGA-MURO等<sup>[10]</sup>利用水力再生浆技术及热降解工艺回收了利乐废料中的焦炭和铝,回收得到具有不同理化性质和氧化物/氢氧化物组成的铝,及具有较低孔隙率和表面含氧官能团的焦炭,可以用作吸附剂去除水溶液中的汞离子。ŞAHİN等<sup>[11]</sup>比较了13种溶剂对纸铝残渣回收效率的影响,结果表明,乙酸对利乐废料中纸铝的分离效果较好,可以明显缩短纸浆浆时间,且纸铝分离的速率随着反应温度升高而增快。

相比较而言,整体利用技术不需要采用复杂的工艺及设备对废弃利乐包装的各组分进行分离。因此,采用整体利用技术制备利乐纤维/胶黏剂复合材料,具有简单、高效及生产成本低等诸多优点<sup>[7]</sup>。

如上所述,国内外研究者在利用利乐纤维制备复合材料方面已做了大量工作。竹纤维(bamboo fiber, BF)具有力学性能优异、资源丰富、可自然降解等优势<sup>[13-16]</sup>,将其与利乐纤维共同用于制备环保、低碳型复合材料,不仅可以促进废弃利乐包装的回收利用,而且有助于推动竹产业的进一步发展。

基于此,本文采用单因素实验分析不同热压工艺参数对TPF复合材料性能的影响,并采用正交实验进行热压工艺参数优化;在此基础上,添加竹纤维对TPF复合材料进行改性,筛选出综合性能满足实际应用的TPF/BF复合材料,以期对废弃利乐包装的回收利用提供新途径和参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

毛竹,购自中国江西省,其主要成分包括约35%的纤维素,15%的半纤维素,20%的木质素,及少量的蛋白质、淀粉、蜡、脂肪、树脂等化合物<sup>[14]</sup>。将毛竹粉碎后通过40目筛网进行分选(在相同热压工艺参数条件下,分别考察了40、60、80、100目竹纤维对复合材料力学性能的影响,结果差异不明显,为提高竹材利用率,实验中均采用40目竹纤维)。

利乐纤维,取自同一品牌的牛奶废弃利乐包装,其由6层结构组成,由外至内分别为聚乙烯、纸板、聚乙烯、铝箔、聚乙烯、聚乙烯,主要成分包括约75%的长纤维纸浆、20%的塑料和5%的铝<sup>[15]</sup>。将利乐包装清洗干净,烘干后粉碎成纤维状。

酚醛树脂胶黏剂,购自太尔胶粘剂(广东)有限公司,固含量为51%。

### 1.2 仪器与设备

CARVER 3895型自动热压机,美国迈可诺克技术有限公司;Instron 3369型万能力学试验机,美国英斯特朗(Instron)公司;SM100 rostrfire型切割式研磨仪,德国莱驰公司;FW177高速粉碎机,天津泰斯特仪器有限公司;RPG-9140A鼓风干燥箱,上海一恒科技有限公司;YG-5L小型混料机,郑州科勒机械设备有限公司;BSM-400锯骨机,天津芝华机械电子有限公司。

### 1.3 TPF复合材料的制备及工艺优化

#### 1.3.1 TPF复合材料的制备方法

首先,将干燥后的利乐纤维分别施加不同施胶量的酚醛树脂,并将施胶后的利乐纤维放在小型混料机中充分混合。然后,将混合物料铺装成幅面为200 mm×200 mm的板材,使用6 mm厚度规限厚,并对板坯进行预压后放入热压机,在不同热压参数条件下进行热压。

#### 1.3.2 单因素实验

利用单因素实验法,分别考察不同热压温度(130、140、150、160、170、180 °C),热压时间(10、12、14、16 min),热压压力(1.2、1.4、1.6、1.8 MPa)及施胶量(10%、12%、14%、16%)等工艺参数对TPF复合材料弹性模量、静曲强度及24 h吸水厚度膨胀率的影响。每组参数设置3个重复试件,结果取平均值,并计算标准偏差。

#### 1.3.3 正交实验

根据单因素实验结果,确定正交实验中各影响因素的水平范围。在正交实验设计中,选取热压温度(A)、热压时间(B)、热压压力(C)、施胶量(D)4个因素为自变量,并为每个因素选取3个不同水平,设计4因素3水平的L9(3<sup>4</sup>)正交实验,具体因素水平设置如表2所示。每个热压参数条件设置3个重复试件,结果取平均值。根据表1的9组工艺参数制备TPF复合材料后,按照GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能实验方法》,对采用9组工艺

参数所制备板材的静曲强度、弹性模量及24 h吸水厚度膨胀率进行测定,并对测定结果进行极差分析。

表1 正交实验条件

实验编号	热压温度/ °C	热压时间/ min	热压压力/ MPa	施胶量/ %
1	150	10	1.2	12
2	150	12	1.4	14
3	150	14	1.6	16
4	160	10	1.4	16
5	160	12	1.6	12
6	160	14	1.2	14
7	170	10	1.6	14
8	170	12	1.2	16
9	170	14	1.4	12

#### 1.3.4 优化工艺验证实验

根据3组优化工艺参数制备TPF复合材料后,对板材的静曲强度、弹性模量及24 h吸水厚度膨胀率进行测定,并与GB/T 11718—2021《中密度纤维板》标准要求的高湿状态下使用的普通型中密度纤维板性能指标进行对比,验证工艺参数的可行性。每个热压参数条件设置3个重复试件,结果取平均值,并计算标准偏差。

#### 1.4 TPF/BF复合材料的制备

在筛选出的最佳工艺条件基础上,利用单因素实验法,制备不同利乐纤维与竹纤维质量比(0:10、3:7、5:5、7:3、8:2、9:1、10:0)的TPF/BF复合材料,制备工艺见图1。根据GB/T 11718—2021《中密度纤维板》,对制得的板材进行静曲强度、弹性模量及24 h吸水厚度膨胀率测定,筛选出TPF/BF复合材料最佳制备工艺参数,每个热压参数条件设置3个重复试件,结果取平均值,并计算标准偏差。

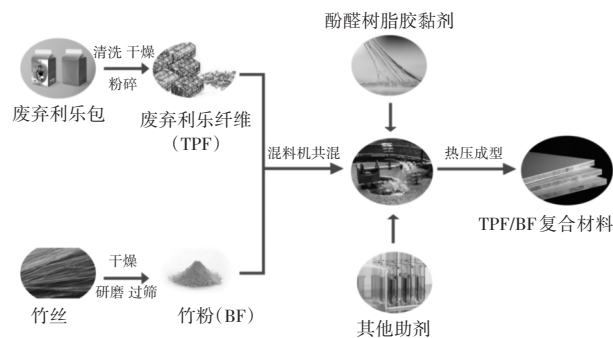


图1 TPF/BF复合材料制备工艺图

#### 1.5 性能测试方法

参照国家标准GB/T 178657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》,测试之前将试件置于温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(65\pm 5)\%$ 环境中平衡至质量恒定,然后分别测定复合材料的静曲强度、弹性模量及24 h吸水厚度膨胀率。

试件24 h吸水厚度膨胀率按式(1)计算:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $T$ 为24 h吸水厚度膨胀率,%;  $t_2$ 为浸水后试件厚度,mm;  $t_1$ 为浸水前试件厚度,mm。

试件静曲强度按式(2)计算:

$$\sigma_b = \frac{3 \times F_{\max} \times l_1}{2 \times b \times t^2} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_b$ 为试件静曲强度,MPa;  $F_{\max}$ 为试件破坏时最大载荷,N;  $l_1$ 为两支座间距离,mm;  $b$ 为试件宽度,mm;  $t$ 为试件厚度,mm。

试件弹性模量按式(3)计算:

$$E_b = \frac{l_2^3}{4 \times b \times t^3} \times \frac{F_2 - F_1}{a_2 - a_1} \quad (3)$$

式中:  $E_b$ 为试件弹性模量,MPa;  $l_2$ 为试件长度,mm;  $b$ 为试件宽度,mm;  $t$ 为试件厚度,mm;  $F_2 - F_1$ 为在载荷-挠度曲线中直线段内载荷的增加量,  $F_1$ 值约为最大载荷的10%,  $F_2$ 值约为最大载荷的40%,N;  $a_2 - a_1$ 为试件中部变形的增加量,即在力  $F_2 \sim F_1$  区间试件变形量,mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素实验

#### 2.1.1 热压温度对TPF复合材料力学性能的影响

不同热压温度对复合材料弹性模量和静曲强度的影响如图2所示。随着热压温度的升高,复合材料的弹性模量和静曲强度均呈现先增大后减小的趋势,二者的峰值均出现在热压温度为 $160^{\circ}\text{C}$ 时。这是因为在温度较低时,复合材料表层向芯层传递的热量较少,胶黏剂的固化程度较低,导致表芯层的强度差较大所致<sup>[16]</sup>。随着热压温度的升高,复合材料芯层温度升高,可以促使芯层胶黏剂快速固化,使复合材料中的纤维结合得更加紧密,从而提高了复合材料的弹性模量和静曲强度。但当温度过高后,复合材料的弹性模量和静曲强度开始明显下降,这可能是因为在较高热压温度条件下,复合

材料中的纤维素及半纤维素降解程度增加,使得纤维的力学性能下降;同时,高温还促使复合材料表面的胶黏剂快速固化,使得胶黏剂未能充分、均匀地渗透到复合材料内部,导致复合材料表芯层内外应力差增加所致。该结果与其他学者研究一致:程亮<sup>[17]</sup>利用热压法制备重组竹材,发现热压温度从140℃提高到180℃,可以使竹材重组材的抗弯模量提高23.3%,内结合强度提高221.4%,认为这归因于竹束板芯层温度的升高增强了酚醛树脂的固化和黏结性能。但热压温度过高可能引发其他负面效应,如材料的热分解及内部蒸气压过高而破坏材料表面等,因此需在实际应用中寻找最佳平衡点<sup>[18]</sup>。为进一步优化热压工艺条件,在热压工艺因素正交实验中,选择150、160、170℃三个热压温度水平梯度。

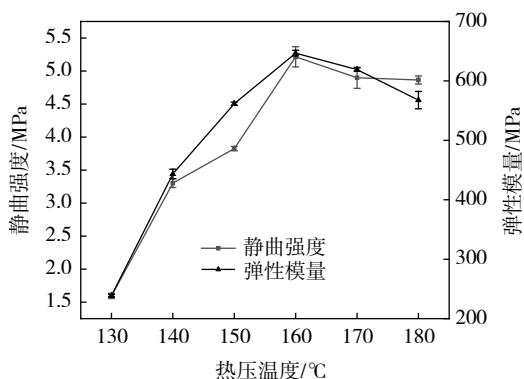


图2 热压温度对TPF复合材料弹性模量及静曲强度的影响

### 2.1.2 热压压力对TPF复合材料力学性能的影响

从图3可以看出:随着热压压力的增大,复合材料的弹性模量和静曲强度均呈现先增大后减小的趋势,二者的峰值均出现在热压压力为1.4 MPa时。这是因为随着热压压力的增加,复合材料间的空气和水分能更快地被排出,内部的孔隙度减少,复合材料内部的纤维与酚醛树脂胶黏剂之间的接触面积增大,因而可以有效提升纤维与胶黏剂间的胶合强度<sup>[18]</sup>。此外,热压压力增加也导致复合材料被压到规定厚度所需的时间减少,进而提高了其内部对流换热和热传导效率<sup>[19]</sup>。然而,当热压压力过大时,纤维的结构极易遭到破坏,导致复合材料的弹性模量和静曲强度下降。在后续的热压工艺因素正交实验中,选择1.2、1.4、1.6 MPa三个热压压力水平梯度。

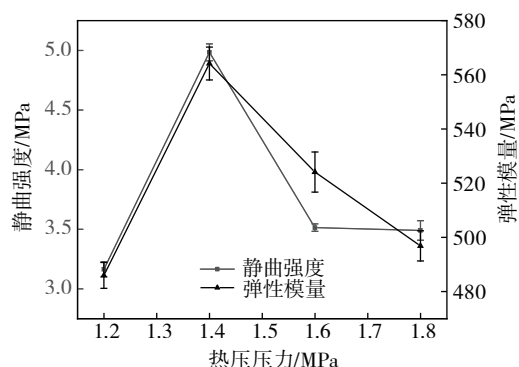


图3 热压压力对TPF复合材料弹性模量及静曲强度的影响

### 2.1.3 热压时间对TPF复合材料力学性能的影响

从图4可以看出:随着热压时间的延长,复合材料的弹性模量和静曲强度均呈现先增大后减小的趋势,二者的峰值均出现在热压时间为12 min时。这主要是由于在热压过程中,随着时间的延长,复合材料芯层可以获得更多胶黏剂固化所需的热量,胶黏剂固化效果越好,胶黏剂与纤维以及纤维之间结合强度越高;同时,热压时间的增加还有助于复合材料内部应力的释放和均匀分布<sup>[20]</sup>。然而,过长的热压时间却会导致纤维的过度热解,使得其弹性模量和静曲强度降低。在后续的热压工艺因素正交实验中,选择10、12、14 min三个热压时间水平梯度。

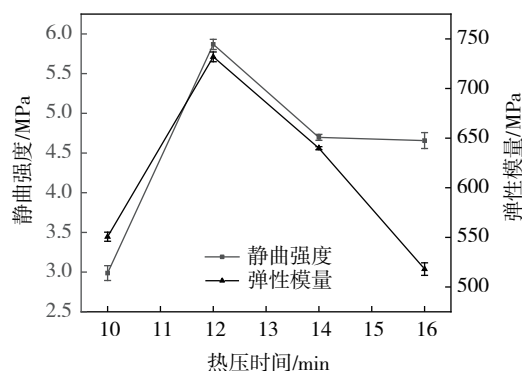


图4 热压时间对TPF复合材料弹性模量及静曲强度的影响

### 2.1.4 施胶量对TPF复合材料力学性能的影响

从图5可以看出:随着施胶量的增大,复合板材的弹性模量和静曲强度均呈现先增大后减小的趋势,二者的峰值均出现在施胶量为14%。这是因为适量的胶黏剂能够有效地增强纤维与竹纤维之间的界面结合能力,有助于纤维的均匀分布和密度的提高,从而使复合材料的弹性模量和静曲强度

增加。然而,当施胶量过大时,胶层变厚,拉伸时胶层易脆裂分层<sup>[21]</sup>,进而对弹性模量和静曲强度产生负面影响。在后续的热压工艺因素正交实验中,选择12%、14%、16%三个施胶量水平梯度。

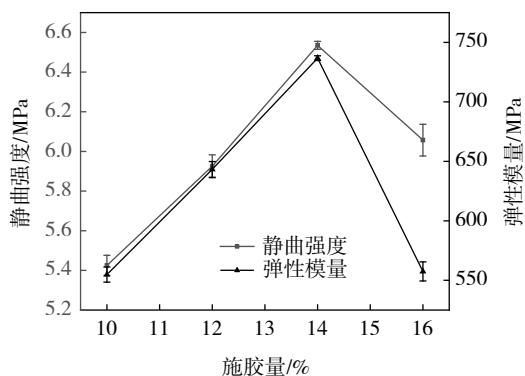


图5 施胶量对TPF复合材料弹性模量及静曲强度的影响

## 2.2 正交实验

由表2的正交实验结果极差分析可以看出:在以弹性模量为检测指标时,制备TPF复合材料的优化工艺参数为热压温度170℃、热压时间14 min、热压压力1.2 MPa、施胶量12%,即 $A_3B_3C_1D_1$ 。在此检测指标下,4个热压工艺参数对利乐纤维板弹性

模量的影响强弱依次为:热压温度>热压时间>热压压力>施胶量。当以静曲强度为检测指标时,其优化的工艺参数为热压温度170℃、热压时间14 min、热压压力1.2 MPa、施胶量16%,即 $A_3B_3C_1D_3$ 。在此检测指标下,4个热压工艺参数对利乐纤维板静曲强度的影响强弱依次为:热压温度>热压时间>热压压力>施胶量。当以24 h吸水厚度膨胀率为检测指标时,其优化的工艺参数为压温度150℃、热压时间10 min、热压压力1.6 MPa、施胶量16%,即 $A_3B_3C_1D_3$ 。在此检测指标下,4个热压工艺参数对利乐纤维板24 h吸水厚度膨胀率的影响强弱依次为:施胶量>热压时间>热压温度>热压压力。这表明,TPF复合材料的弹性模量和静曲强度主要受热压因素影响,尤其是受热压温度的影响最大。而24 h吸水厚度膨胀率则主要取决于施胶量,一般而言,酚醛树脂胶黏剂用量越大,复合材料的尺寸稳定性越好,这主要是因为酚醛树脂本身不溶于水,在高温、高压条件下,酚醛树脂渗透并分散到复合材料内部,堵塞了部分水分进出的通道,并且酚醛树脂在高温、高压条件下,可以和纤维中的游离羟基反应,从而减少了纤维中水分吸附场所的数量<sup>[21-22]</sup>。

表2 正交实验结果极差分析

性能指标	水平值	热压温度(A)	热压时间(B)	热压压力(C)	施胶量(D)
弹性模量	$k_1$	850.83	823.53	971.26	939.80
	$k_2$	782.30	847.11	840.05	846.16
	$k_3$	1 031.81	994.29	853.62	878.97
	R	249.51	170.76	131.21	93.64
静曲强度	$k_1$	9.95	9.46	10.72	10.22
	$k_2$	8.86	9.61	9.46	9.77
	$k_3$	11.46	11.20	10.09	10.28
	R	2.60	1.744	1.267	0.51
24 h吸水厚度 膨胀率	$k_1$	7.63	7.83	9.43	10.47
	$k_2$	9.53	8.60	8.97	8.17
	$k_3$	9.30	10.03	8.07	7.83
	R	1.90	2.20	1.37	2.63

## 2.3 优化工艺验证结果分析

基于正交实验极差分析结果,以弹性模量、静曲强度及24小时厚度膨胀率作为评价指标,筛选出 $A_3B_3C_1D_1$ 、 $A_3B_3C_1D_3$ 及 $A_1B_1C_3D_3$ 三组热压实验条件进行制备TPF复合材料最优工艺的验证实验,结果如表3所示。根据标准GB/T 11718—2021,三组复合材料的弹性模量及静曲强度均未达到标准要求。

其中, $A_3B_3C_1D_1$ 、 $A_3B_3C_1D_3$ 及 $A_1B_1C_3D_3$ 组复合材料的弹性模量分别达到标准要求的82.94%、75.37%及25.65%,静曲强度分别达到标准要求的74.23%、76.88%及30.50%;可见,除 $A_1B_1C_3D_3$ 组复合材料的弹性模量及静曲强度与标准要求差距过大外,其他两组与标准要求相差不大,且可以通过改性工艺进行性能提升。三组复合材料的24 h吸收厚度膨胀

率均满足标准要求。考虑到该复合材料主要应用于户外,酚醛树脂含量较高有利于增强复合材料的耐久性,延长其使用寿命,因此,选择 $A_3B_3C_1D_3$ 作为制备TPF/BF复合材料的工艺参数条件。

表3 优化工艺验证分析

实验	弹性模量/MPa	静曲强度/MPa	24 h吸水厚度膨胀率/%
$A_3B_3C_1D_1$	2 156.40±11.25	19.30±0.12	12.60±0.23
$A_3B_3C_1D_3$	1 959.70±21.45	19.99±0.67	11.10±0.51
$A_1B_1C_3D_3$	666.95±10.68	7.93±0.42	5.80±0.17

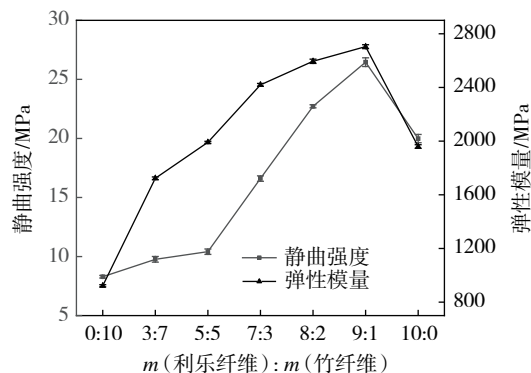
注:根据GB/T 11718—2021,弹性模量 $\geq 2600$  MPa,静曲强度 $\geq 26.0$  MPa,24 h吸水厚度膨胀率 $\leq 14.0\%$ 。

## 2.4 竹纤维添加量对TPF/BF复合材料性能的影响

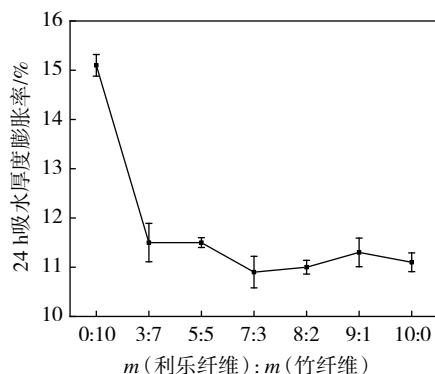
为了增强TPF复合材料的力学性能,在原料中加入不同比例的竹纤维,采用正交实验中得出的优化工艺参数,即热压温度 $170\text{ }^\circ\text{C}$ 、热压时间 $14\text{ min}$ 、热压压力 $1.2\text{ MPa}$ 、施胶量 $16\%$ ,进行TPF/BF复合材料的制备。不同竹纤维添加量对TPF/BF复合材料弹性模量、静曲强度及24 h吸水厚度膨胀率的影响如图6所示。从图6(a)可以看出:当竹纤维添加比例为 $100\%$ 时,TPF/BF复合材料的静曲强度及弹性模量分别为 $8.29\text{ MPa}$ 及 $922.26\text{ MPa}$ ,均处于所有复合材料中的最低值;随着利乐纤维比例的增加,静曲强度及弹性模量开始明显增加,当利乐纤维与竹纤维之间比例达到 $9:1$ 时,静曲强度及弹性模量达到峰值。这表明,在该工艺参数条件下,竹纤维的添加量不是越多越好,而是存在一个合适的平衡点。这可能是因为,利乐纤维中含有的聚乙烯树脂在高温高压下可以起到胶黏剂的作用,而竹纤维中没有聚乙烯成分,所以在该工艺条件下,当胶黏剂施加量过少时,无法保证与竹纤维充分黏合。而用 $10\%$ 竹纤维代替 $10\%$ 利乐纤维时,TPF/BF复合材料的静曲强度及弹性模量分别达到 $26.46\text{ MPa}$ 和 $2\text{ }703.88\text{ MPa}$ ,比未添加竹纤维时的静曲强度和弹性模量分别提升了 $25.46\%$ 和 $37.97\%$ ,这两项强度指标已达到了国标的要求。这表明,在该工艺条件下,加入适量的竹纤维更有利于发挥竹纤维自身优异的物理、力学性能,改善复合材料的静曲强度及弹性模量。

从图6(b)可以看出:当竹纤维添加比例为 $100\%$ 时,TPF/BF复合材料的24 h吸水厚度膨胀率为 $15.1\%$ ,为所有复合材料中的最高值;随着利乐纤维比例的增加,24 h吸水厚度膨胀率开始明显下降,当

利乐纤维与竹纤维之间比例达到 $3:7$ 后,TPF/BF复合材料的24 h吸水厚度膨胀率均降到 $14\%$ 以下,满足国标的要求,这主要是由于利乐纤维中含有一定比例的疏水性成分聚乙烯所致。



(a) 弹性模量及静曲强度



(b) 24 h吸水厚度膨胀率

图6 原料配比对TPF/BF复合材料性能的影响

## 3 结论

本研究以利乐纤维和竹纤维作为原料,考察了热压温度、热压压力、热压时间、施胶量等参数对TPF/BF复合材料性能的影响,主要结论如下:

(1) TPF复合材料的弹性模量及静曲强度均随热压温度、热压时间、热压压力、施胶量的增加,呈先增加后降低趋势。

(2) 热压温度对TPF复合材料力学性能的影响最大,而施胶量则是影响复合材料尺寸稳定性的最关键因素。TPF复合材料的最优制备工艺参数为热压温度 $170\text{ }^\circ\text{C}$ 、热压时间 $14\text{ min}$ 、热压压力 $1.2\text{ MPa}$ 、施胶量 $16\%$ 。

(3) 利用 $10\%$ 竹纤维代替 $10\%$ 利乐纤维制备TPF/BF复合材料,可以使得复合材料的各项性能均

满足 GB/T 11718—2021《中密度纤维板》中对于高湿度条件下普通纤维板的要求,其静曲强度、弹性模量及 24 h 吸水厚度膨胀率分别达到 26.46 MPa、2 703.88 MPa 及 11.3%。

本实验仅针对 TPF/BF 复合材料在高湿度应用场景下的力学性能和尺寸稳定性,明确了其工艺要求;但在户外等其他应用环境中,复合材料需要经受光照、雨水等更复杂的环境因子考验。因此,未来研究将聚焦 TPF/BF 复合材料的耐候性改性,通过改善复合材料的疏水性、抗光降解性、阻燃性、抗生物劣化能力等,确保其在户外环境中的安全使用,并有效延长使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 陈铤,李聪,刘思杨,等.基于利乐包再生塑料增韧 PA6 的应用研究[J].塑料工业,2022,50(11):41-45,87.
- [2] 叶聪贤,钱庆荣,曹长林,等.碳中和目标下利乐包的高值化回收利用[J].再生资源与循环经济,2022,15(2):34-38.
- [3] YEO K S, GO K S, JEON W Y, et al. Integrating chemical and biological technologies in upcycling plastic waste to medium-chain  $\alpha,\omega$ -diacid[J]. Journal of cleaner production, 2024, 451: 141890.
- [4] KHERDEKAR R D, ADE A B. Integrated approaches for plastic waste management[J]. Frontiers in microbiology, 2024, 15: 1426509.
- [5] VALDES - RODRIGUEZ E M, FRIAS - GASPARRI L, MENDOZA-CASTILLO D I, et al. Preparation of Tetra Pak-based hydrochars for cleaning water polluted by heavy metal ions: physicochemical properties and removal mechanism[J]. International journal of chemical engineering, 2023, 2023: 1-13.
- [6] BONOCORE G, DELUCA P. Preparation and characterization of insulating panels from recycled poly laminate (Tetra Pak) materials[J]. Sustainability, 2022, 14(11): 6858.
- [7] BAL B C. Mechanical properties of wood-plastic composites produced with recycled polyethylene, used Tetra Pak<sup>®</sup> boxes, and wood flour[J]. BioResources, 2022, 17(4): 6569-6577.
- [8] EBADI M, FARSI M, NARCHIN P, et al. The effect of beverage storage packets (Tetra Pak) waste on mechanical properties of wood-plastic composites[J]. Journal of thermoplastic composite materials, 2016, 29: 1601-1610.
- [9] EBADI M, FARSI M, NARCHIN P. Some of the physical and mechanical properties of composites made from Tetra Pak<sup>™</sup>/LDPE[J]. Journal of thermoplastic composite materials, 2018, 31: 1054-1165.
- [10] ZUNIGA - MURO N M, BONILLA - PETRICIOLET A, MENDOZA-CASTILLO D I, et al. Recycling of Tetra Pak wastes via pyrolysis: characterization of solid products and application of the resulting char in the adsorption of mercury from water[J]. Journal of cleaner production, 2021, 291: 125219.
- [11] GO Ş, GIZEM Z, MUSTAFA K. Process and machinery design for the recycling of Tetra Pak components[J]. Journal of cleaner production, 2021, 323: 129186.
- [12] 霍鑫升,杨国超,张求慧.热处理对竹材理化性能影响研究进展[J].包装工程,2023,44(5):24-33
- [13] 曾祥荣,黄鹏,许福,等.竹基复合材料及其缠绕管助力双碳目标的实现[J].中国科技信息,2024,(2):108-110.
- [14] 李宇,吴圣众,吴克勤,等.基于响应面法的超薄竹刨花板制备工艺优化[J].竹子学报,2022,41(2):7-14.
- [15] 黄圣波,刘偲,黄钦府,等.热压工艺对翅荚木芯细木工板性能的影响[J].林产工业,2023,60(1):9-14,32.
- [16] 杜瑛.毛竹的主要成分分析及催化热解研究[D].成都:四川大学,2005.
- [17] 韩述.利乐包回收利用大有作为[J].绿色包装,2018(4):82-83.
- [18] NKEUWA W N, ZHANG J, SEMPLE, et al. Bamboo based composites: a review on fundamentals and processes of bamboo bonding[J]. Composites part B: engineering, 2022, 235: 109776.
- [19] 程亮.重组竹材制造技术的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [20] GE Y, LU T, LI X, et al. Changes in temperature and vapor-pressure behavior of bamboo scrimber in response to hot-pressing parameters[J]. Forests, 2024, 15: 620-633.
- [21] ANDERSON J P, ALTAN M C. Formation of voids in composite laminates: coupled effect of moisture content and processing pressure[J]. Polymer composites, 2015, 36: 376-384.
- [22] HUANG Y, LIN Q, YANG C, et al. Multi-scale characterization of bamboo bonding interfaces with phenol-formaldehyde resin of different molecular weight to study the bonding mechanism[J]. Journal of the royal society interface, 2020, 17: 20190755.
- [23] 杨红旗,陈广辉,王金林.PVAc改性酚醛树脂制备铝木复合材料研究[J].西北林学院学报,2013,28(1):170-173.
- [24] 周英豪,陈海丽,侯俊峰,等.圆竹酚醛树脂复合管材的制备及其性能[J].林业工程学报,2024,9(1):67-74.

## Preparation and Properties of Tetra Pak Fiber/Bamboo Fiber Composite

YU Han<sup>1</sup>, GUO Hui<sup>1</sup>, NONG Jinlin<sup>1</sup>, HE Yunke<sup>1</sup>, YU Lili<sup>1</sup>, SONG Kun<sup>2</sup>

(1.College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2.Zhejiang Great Shengda Packaging Co., Ltd., Hangzhou 311215, China)

**Abstract:** In order to promote the recycling of discarded Tetra Pak packages and reduce the environmental harm caused by discarded Tetra Pak packaging materials, a study was conducted on the compounding of the fibers obtained after crushing discarded Tetra Pak packages (referred to as Tetra Pak fibers, TPF for short), bamboo fibers (BF), and phenolic resin to prepare TPF composite materials with practical application value. A single-factor experiment was adopted to analyze the influence of each hot-pressing process parameter on the mechanical properties of the composite material, and an orthogonal experiment was employed to optimize the hot-pressing process parameters. On this basis, bamboo powder was used to modify the TPF composite material, and the Tetra Pak fiber/bamboo fiber composite (TPF/BF) composite material was obtained. The results showed that the elastic modulus and static bending strength of the TPF composites increased firstly and then decreased with the increase of the process parameters such as hot pressing temperature, hot pressing time, hot pressing pressure, and the adhesive content. The hot-pressing temperature has the greatest influence on the mechanical properties of the composite, while the amount of sizing is the key factor affecting the dimensional stability of the composite. The optimal process for preparing the TPF composite material is as follows: the hot-pressing temperature is 170 °C, the hot-pressing time is 14 minutes, the hot-pressing pressure is 1.2 MPa, and the sizing amount is 16%. Under these process conditions, replacing 10% of the Tetra Pak fibers with bamboo fibers can ensure that all the properties of the prepared TPF/BF composite material meet the requirements of GB/T 11718—2021 "Medium Density Fiberboard" for different application fields.

**Key words:** waste Tetra Pak fiber; bamboo fiber; hot pressing process parameters; mechanical property; dimensional stability

(上接第30页)

## Preparation and Properties of Rice Straw Nanofiber-based Flocculant

LIN Peng, XIANG Li, CHEN Sikai, ZHANG Han

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Rice straw was used as raw material to extract cellulose by alkali treatment and low-temperature phase change method. Then an anionic natural polymer flocculant (TOCNF) with carboxyl functional groups and nanofiber structure on the surface was further prepared by TEMPO oxidation. Flocculation and sedimentation experiments demonstrated that the combination of TOCNF with conventional coagulants exhibited excellent flocculation performance. Specifically, calcium chloride and ferric chloride were the most effective in combination with TOCNF-1, respectively. At the dosing ratio of 1:2, the removal of suspended solids increased by 11.7% for calcium chloride and 57.8% for ferric chloride, with turbidity reduced by 91.9% and 97.8%, respectively. Furthermore, the study revealed that the fiber size and surface charge of TOCNF significantly influenced both removal efficiency and sedimentation rate.

**Key words:** flocculant; rice straw; cellulose nanofiber