

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.001

高填充油茶果壳基木塑复合材料的制备及力学性能

刘翔宇^{1,2}, 杨逸飞^{1,2}, 徐道春^{1,2}, 李文彬^{1,2}, 白效鹏^{1,2}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以油茶果壳和不同塑料即聚丙烯、高密度聚乙烯(PE-HD)、低密度聚乙烯、线性低密度聚乙烯为原料, 采用模压成型的方法制备了高填充油茶果壳基木塑复合材料, 利用电子万能试验机和悬臂梁冲击试验机测试其力学性能。通过单因素试验分析塑料种类对复合材料力学性能的影响, 确定较优塑料种类后进一步优化制备参数。以壳粉含量、增容剂马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)含量、热压温度、热压时间为设计因素, 以弯曲强度、弯曲弹性模量、拉伸强度、冲击强度为力学性能优化目标, 设计 $L_9(3^4)$ 正交试验, 研究了高填充油茶果壳基木塑复合材料的制备工艺, 利用极差分析和方差分析得到了较优配方和工艺参数组合。研究表明: 当添加塑料为 PE-HD 时, 复合材料的弯曲强度最大为 34.40 MPa, 拉伸强度最大为 18.20 MPa, 力学性能较优; 壳粉含量为 65% 时, 添加 7% MAPE 的复合材料强度较好, 弯曲强度最大为 33.66 MPa; 优化制备参数组合为壳粉含量 55%, MAPE 含量 5%, 热压温度 160 °C, 热压时间 10 min。

关键词: 油茶果壳; 木塑复合材料; 高密度聚乙烯; 力学性能; 正交试验

中图分类号: TS229 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)01-0001-07

Preparation and mechanical properties of wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells

LIU Xiangyu^{1,2}, YANG Yifei^{1,2}, XU Daochun^{1,2}, LI Wenbin^{1,2}, BAI Xiaopeng^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Lab of State Forestry Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China)

Abstract : The wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells were prepared by using camellia oleifera shells and different plastics, namely polypropylene, high-density polyethylene (PE-HD), low-density polyethylene and linear low-density polyethylene as raw materials by employing the compression molding method. The mechanical properties of the composite materials were tested using an electronic universal testing machine and a cantilever beam impact testing machine. The influence of plastic types on the mechanical properties of the composite materials was analyzed through single-factor experiments, and after the optimal plastic type was determined, the preparation parameters were further optimized. Using the shell powder content, maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) content as compatibilizer, hot pressing temperature, and hot pressing time as design factors, and using flexural strength, flexural modulus, tensile strength, and impact strength as optimization targets for mechanical properties, an $L_9(3^4)$ orthogonal experiment was designed to study the preparation process of wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells, the optimal formulation and process parameters combination were obtained through range analysis and variance analysis. The research results show that the inclusion of PE-HD as the plastic component results in a maximum flexural strength of 34.40 MPa and a maximum tensile strength of 18.20 MPa for the composite materials, demonstrating its superior mechanical properties. When the shell powder content reaches 65%, the addition of 7% MAPE enhances the strength, leading to a maximum flexural strength of 33.66 MPa. The optimized preparation parameter combination is shell powder content of 55%, MAPE content of 5%, hot pressing temperature of 160 °C, and hot pressing time of 10 minutes.

Keywords : camellia oleifera shell ; wood-plastic composite material ; high-density polyethylene ; mechanical property ; orthogonal test

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题项目(2019YFD1002401-3), 江西省德义行油茶开发有限公司项目(2022HXFWGXY007)

通信作者: 徐道春, 博士, 教授, 主要从事林业生物质材料加工研究

收稿日期: 2023-11-08

引用格式: 刘翔宇, 杨逸飞, 徐道春, 等. 高填充油茶果壳基木塑复合材料的制备及力学性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(1): 1-7.

LIU Xiangyu, YANG Yifei, XU Daochun, et al. Preparation and mechanical properties of wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1): 1-7.

油茶是世界四大木本油料植物之一^[1]。2021年我国油茶籽年产量达394.23万吨,在加工分离油茶籽时,每吨油茶果约产生0.54吨果壳^[2-3]。目前,油茶果壳处理以焚烧或填埋为主,处理过程中产生的废气、废液和残留物对环境安全构成潜在威胁^[4-5]。近年来研究表明油茶果壳可用于肥料^[6]、活性炭^[5]、提取茶皂素^[7]、生产乙醇、香兰素和低聚木糖^[3]、制备木质复合材料^[8]。

木塑复合材料是生物质原料与塑料经过成型工艺形成的一种木质新材料^[9],可有效提高农林剩余物及塑料废弃物的高值化利用水平。具有比木材更优良的物理性能,又保留了塑料易加工、耐老化耐腐蚀、不易吸湿变形的特点^[10]。但油茶果壳较少用于木质复合材料,尤其是木塑复合材料。Choupani等^[11]使用油茶果壳作为制造刨花板的替代原料,研究了果壳含量对刨花板的影响,还研究了粒径和对比对刨花板性能的影响^[12]和热压过程的传热效率^[13]。胡孔飞等^[14]研究了油茶果壳碎料板中胶黏剂、碎料形态和碱处理对其力学性能的影响。彭开元^[8]通过制备聚丙烯(PP)/油茶果壳粉复合材料获得壳粉粒径60~80目、含量40%和KH550含量3%的较优工艺参数。吴昊等^[15]探究了油茶果壳粒径、添加量以及马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)添加量对高密度聚乙烯(PE-HD)/油茶果壳复合材料拉伸、弯曲和冲击性能的影响。

使用油茶果壳制备木塑复合材料可实现油茶果壳的高值化利用,但高于40%含量油茶果壳的高填充木塑复合材料^[16]的配方和工艺还需进一步研究。因此笔者采用单因素试验探讨了塑料种类对高填充油茶果壳木塑复合材料的影响,确定了最佳塑料种类。使用正交试验法分析壳粉含量、增容剂MAPE用量、热压温度、热压时间对油茶果壳粉/PE-HD复合材料的影响,确定了较优的配方和工艺参数,提高了油茶果壳在复合材料中的占比,降低了生产成本,为木塑复合材料生产企业提供了丰富的原料资源。

1 实验部分

1.1 主要原料

油茶果壳:长林系列,江西省上饶市鄱阳县;

PP:PPB-M02,密度0.90~0.92 g/cm³,熔点164~170℃,山东优索化工科技有限公司;

PE-HD:5000S,密度0.94~0.96 g/cm³,熔点130

~142℃,山东优索化工科技有限公司;

低密度聚乙烯(PE-LD):2426H,密度0.90~0.92 g/cm³,熔点110~115℃,山东优索化工科技有限公司;

线性低密度聚乙烯(PE-LLD):DFDA-7042,密度0.92~0.93 g/cm³,熔点约120℃,山东优索化工科技有限公司;

MAPE:DINGHAI,接枝率1.2%,东莞市鼎海塑胶化工有限公司;

聚乙烯蜡、滑石粉、抗氧剂1010:山东优索化工科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

立式粉碎机:15B,中国海维科技有限公司;

恒温鼓风干燥箱:DHG-9030A,上海精宏实验设备有限公司;

振筛机:8411,绍兴上虞祥达仪器制造有限公司;

开炼机:BD-8818-F-80,东莞市宝鼎精密仪器有限公司;

平板硫化机:BD-8820-E,东莞市宝鼎精密仪器有限公司;

电子万能试验机:DR-507A,东莞市东日仪器有限公司;

悬臂梁冲击试验机:ZOT-6032,广东中天仪器股份有限公司。

1.3 实验设计

木塑复合材料的性能与塑料组分的性能有关,一般使用较低强度塑料的木塑复合材料强度也较低。PP,PE-HD,PE-LD,PE-LLD产量大、价格低,是木塑复合材料产业常用塑料,PE-LD和PE-LLD综合力学强度比PP和PE-HD低,但韧性好,冲击强度高,加入到PP基或PE-HD基木塑复合材料可提高其冲击强度^[17]。故采用单因素试验分析塑料种类对高填充油茶果壳基木塑复合材料力学性能的影响以确定塑料种类。以该塑料组分进一步优化压制参数和配方,设计了 $L_9(3^4)$ 正交试验,弯曲强度、弯曲弹性模量、拉伸强度、冲击强度为力学性能优化目标,壳粉含量(A)、增容剂MAPE含量(B)、热压温度(C)、热压时间(D)为设计因素。因素水平表见表1,正交表各列均被因素排满未留空白列,故进行重复试验。

表1 因素水平表

Tab. 1 Table of factors and corresponding levels

Level	Factor			
	A/%	B/%	C/°C	D/min
1	55	3	140	10
2	60	5	150	12
3	65	7	160	14

1.4 试样制备

图1为油茶果壳木塑复合材料的制备过程,粉碎油茶果壳后过筛分选出60目~80目(180~250

μm)粒径的壳粉,105℃干燥至含水率2%以下。按照表2配方称量塑料、助剂及壳粉,先后放入开炼机中混炼,混炼温度170℃,混炼至颜色均匀。在模具中铺装混炼后的材料,经过热压后再冷压制备成复合材料。热压参数如下:预热至材料软化,温度为180℃,预压1 MPa,3 min;增压6 MPa,5 min;冷压无压力,20 min。复合材料尺寸:200 mm×80 mm×3 mm,预设密度为1 g/cm³。

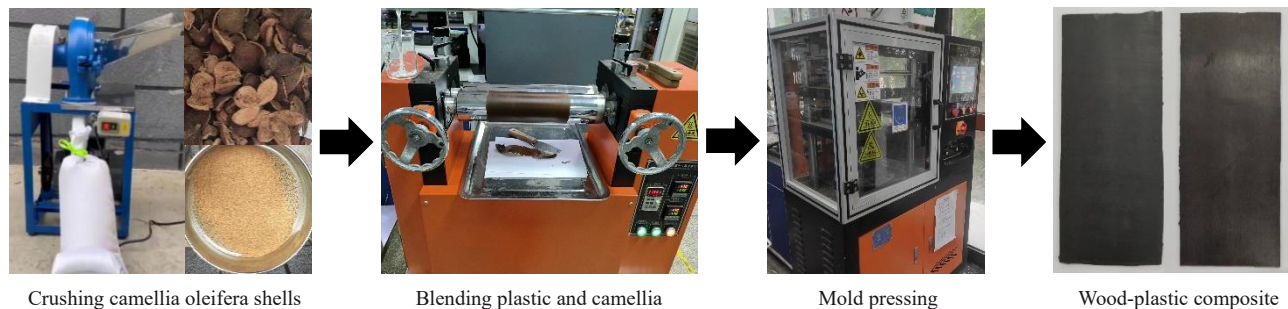


图1 高填充油茶果壳基本塑复合材料制备过程

Fig. 1 Preparation process of wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells

在不同塑料组分制备的复合材料中,综合力学性能最佳的是使用PE-HD组分的复合材料。进一步优化压制参数和配方,研究塑料组分为PE-HD时,壳粉含量、增容剂MAPE含量以及热压温度、热压时间对油茶果壳粉/PE-HD复合材料力学性能的

影响。PE-HD的熔点130~142℃,因此调整工艺参数:混炼温度为145℃,热压温度140~160℃。配方中油茶果壳粉含量为55%,60%,65%,对应PE-HD含量为39%,34%,29%,MAPE含量为3%,5%,7%,助剂用量和种类见表2。

表2 不同塑料组分的高填充油茶果壳基本塑复合材料配比

Tab. 2 Proportion of wood-plastic composite materials of high-filled camellia oleifera shells with different plastic components

Specimen code	Camellia oleifera shell powder/%	PP/%	PE-HD/%	PE-LD/%	PE-LLD/%	MAPE/%	Additive/%
PP	50	44	/	/	/	3	3
PP/PE-LD	50	22	/	22	/	3	3
PP/PE-LLD	50	22	/	/	22	3	3
PE-HD	50	/	44	/	/	3	3
PE-HD/PE-LD	50	/	22	22	/	3	3
PE-HD/PE-LLD	50	/	22	/	22	3	3

Note: The additives are mixed in a mass ratio of 1.5:1:0.5, consisting of talcum powder, polyethylene wax, and antioxidant 1010.

1.5 性能测试

拉伸性能:参照GB/T 1040-2022测试拉伸强度,拉伸速度为20 mm/min。

弯曲性能:参照GB/T 9341-2008测试弯曲强度、弯曲弹性模量,测试速度为2 mm/min。

冲击性能:参照GB/T 1843-2008测试冲击强度,对无缺口试样侧面进行冲击。

2 结果与讨论

2.1 塑料种类对高填充油茶果壳基本塑复合材料力学性能的影响

图2~图4为不同塑料的高填充油茶果壳基本

塑复合材料力学性能。随着低密度塑料PE-LD或PE-LLD的加入,除冲击强度增大外,弯曲强度、弯曲弹性模量和拉伸强度都有所降低。弯曲强度和弯曲弹性模量体现了防止材料破坏和变形的能力。塑料组分仅为PE-HD的复合材料弯曲强度最大为34.40 MPa,拉伸强度最大为18.20 MPa,综合力学性能最佳。其次是PP基复合材料,加入PE-LD或PE-LLD的复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量较差。与余旺旺等^[18]制备麦秸粉木塑时,PE-HD和PP基复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量最好,PE-LLD基复合材料较差的结果相同。综合来看,PE-HD适

合单独制作具有高强度要求的高填充油茶果壳基木塑复合材料。虽然PE-LD或PE-LLD能提高复合材料的冲击强度,但弯曲强度、弯曲弹性模量和拉伸强度均明显降低,不适合作为高填充油茶果壳基木塑复合材料的主要塑料成分。

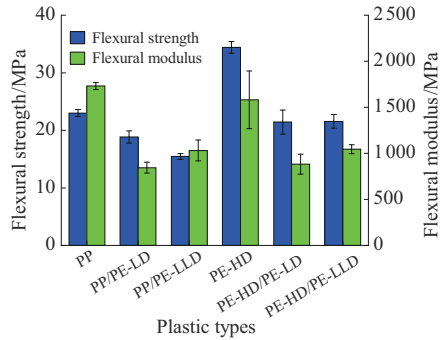


图2 不同塑料基复合材料的弯曲性能

Fig. 2 Flexural properties of different plastic based composites

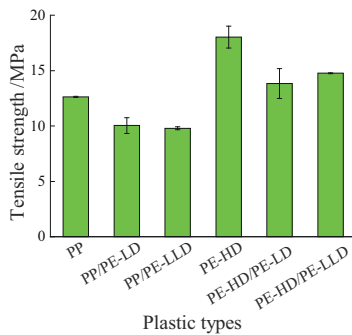


图3 不同塑料基复合材料的拉伸强度

Fig. 3 Tensile strength of different plastic based composites

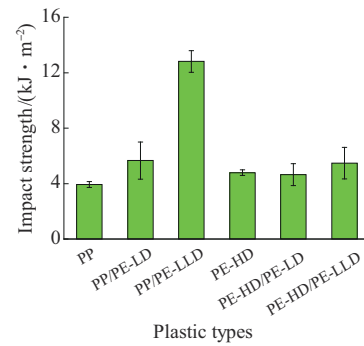


图4 不同塑料基复合材料的冲击强度

Fig. 4 Impact strength of different plastic based composites

2.2 油茶果壳粉/PE-HD 复合材料正交试验结果与分析

选用 $L_9(3^4)$ 正交试验分析油茶果壳粉/PE-HD 复合材料压制参数和配方对其力学性能的影响,结果见表3,极差分析和方差分析见表4。

根据表3~表4可知,当壳粉含量为65%时,添加7% MAPE的复合材料强度较好,弯曲强度最大为33.66 MPa,弯曲弹性模量为2 107 MPa,拉伸强度为15.07 MPa,冲击强度为2.71 MPa。各因素对油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能各指标的影响强弱不同^[19],对弯曲强度的影响强弱依次为 $B>D>A>C$;对弯曲弹性模量的影响强弱依次为 $A>D>C>B$;对拉伸强度的影响强弱依次为 $A>B>D>C$;对冲击强度的影响强弱依次为 $A>B>D>C$ 。

表3 油茶果壳粉/PE-HD 复合材料正交试验 $L_9(3^4)$ 结果

Tab. 3 Results of orthogonal experiment $L_9(3^4)$ on Camellia oleifera shell powder/PE-HD composite materials

No.	A/%	B/%	C/°C	D/min	Flexural strength/MPa			Flexural modulus/MPa			Tensile strength/MPa			Impact strength/(kJ·m ⁻²)		
					I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	55	3	140	10	29.65	28.47	30.03	1 760	1 721	1 799	14.69	14.46	14.06	3.25	3.92	5.06
2	55	5	150	12	31.03	31	30.85	1 550	1 722	1 609	16.07	17.31	15.25	4.1	4.17	3.93
3	55	7	160	14	34.03	32.25	34	1 771	1 691	1 595	18.05	17.58	17.51	4.27	4.83	4.55
4	60	3	150	14	27.4	27.97	30.93	1 825	1 742	1 962	6.81	9.29	10.6	3.08	2.38	2.74
5	60	5	160	10	30.63	32.13	26.94	1 843	2 006	1 619	13.63	14.05	13.98	3.53	3.64	2.71
6	60	7	140	12	27.64	27.9	27.13	1 729	1 943	1 723	15.18	15.31	11.92	3.02	3.2	2.96
7	65	3	160	12	23.8	23.07	23.92	1 832	1 863	1 871	14.36	12.52	13.99	2.06	2.98	2.49
8	65	5	140	14	29.62	31.16	28.24	2 005	1 813	2 153	11.27	10.43	12.4	3.18	3.08	4.35
9	65	7	150	10	29.27	33.66	30.27	1 780	2 107	2 172	15.86	15.07	12.49	2.7	2.71	3.26

2.2.1 油茶果壳粉含量对油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能的影响

由表3~表4可知,壳粉含量与复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量、拉伸强度、冲击强度显著相关,对拉伸强度和冲击强度影响最大。弯曲强度、拉伸强度和冲击强度随壳粉含量增多呈下降趋势,弹性模量略上升。结果与 BARBOS 等^[20]用 PE-HD

和60%,65%,70%的木粉制备木塑复合材料,随木粉含量增加弯曲强度降低,在65%木粉含量时弯曲弹性模量最大相同。

油茶果壳粉中纤维素呈排列状的结构同时有较强的氢键,具有较高的刚度,木质素则起结合作用,使纤维素分子有效地传递应力。因此少量壳粉可以提高复合材料的强度^[21],但高含量的壳粉与

表4 油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能指标的极差分析和方差分析

Tab. 4 Analysis of range and variance of mechanical properties of camellia oleifera shell powder/PE-HD composites

Evaluation index		A	B	C	D
Flexural strength	k ₁	31.257	27.249	28.871	30.117
	k ₂	28.741	30.178	30.264	27.371
	k ₃	28.112	30.683	28.974	30.622
	R	3.144	3.434	1.393	3.251
	Better level	A ₁	B ₃	C ₂	D ₃
	Primary and secondary factor	3	1	4	2
	F	11.086	13.768	2.413	12.256
	Significance	***	***		***
	k ₁	1690.889	1819.444	1849.556	1867.444
	k ₂	1821.333	1813.333	1829.889	1760.222
Flexural modulus	k ₃	1955.111	1834.556	1787.889	1839.667
	R	264.222	21.222	61.667	107.222
	Better level	A ₃	B ₃	C ₁	D ₁
	Primary and secondary factor	1	4	3	2
	F	9.043	0.062	0.514	1.604
	Significance	***			
	k ₁	16.109	12.309	13.302	14.254
	k ₂	12.308	13.821	13.194	14.657
	k ₃	13.154	15.441	15.074	12.660
	R	3.801	3.132	1.880	1.997
Tensile strength	Better level	A ₁	B ₃	C ₃	D ₂
	Primary and secondary factor	1	2	4	3
	F	23.478	14.466	6.570	6.574
	Significance	***	***	***	***
	k ₁	4.231	3.107	3.558	3.420
	k ₂	3.029	3.632	3.230	3.212
	k ₃	2.979	3.500	3.451	3.607
	R	1.252	0.526	0.328	0.394
	Better level	A ₁	B ₂	C ₁	D ₃
	Primary and secondary factor	1	2	4	3
Impact strength	F	19.020	2.828	1.058	1.473
	Significance	***	*		
	k ₁	4.231	3.107	3.558	3.420
	k ₂	3.029	3.632	3.230	3.212
	k ₃	2.979	3.500	3.451	3.607
	R	1.252	0.526	0.328	0.394
	Better level	A ₁	B ₂	C ₁	D ₃
	Primary and secondary factor	1	2	4	3
	F	19.020	2.828	1.058	1.473
	Significance	***	*		

Notes: $F_{0.1}(2, 18)=2.62$, $F_{0.05}(2, 18)=3.55$, $F_{0.01}(2, 18)=6.01$; “***” shows extremely significant difference, “**” shows relatively significant difference, “*” shows significant difference.

PE-HD 之间缺乏紧密结合,相容性差导致大量形状不规则的微孔或微缺陷,使得应力从基体向纤维的传递较差,导致力学性能降低^[15]。55%壳粉木塑复合材料强度最好,与通常情况下使用 50%~60% 的木材的木塑复合材料的力学性能最好相符合。

2.2.2 增容剂用量对油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能的影响

由表 3~表 4 可知,增容剂 MAPE 用量与复合材料弯曲强度和拉伸强度显著相关,冲击强度次之,对弯曲强度影响最大。弯曲强度和拉伸强度随 MAPE 用量增加而增大,冲击强度先增后减。当增容剂用量从 3% 增加到 5% 时,弯曲强度提高了 10.75%,继续增加至 7%,弯曲强度仅提高了 1.67%。与李洋^[22]实验时添加 MAPE 的玻璃纤维/木塑复合

材料的最大弯曲强度比未添加时提高了 21.6% 的结果相同。

弯曲强度和拉伸强度的增加是由于壳粉和 PE-HD 基体之间界面结合的改善,MAPE 的酸酐部分与壳粉的表面羟基发生酯化反应^[23],暴露在外的聚烯烃链扩散到 PE-HD 中,并在热压过程中缠结。过少的增容剂则效果不佳,过多用量会增加生产成本,还可能在壳粉与 PE-HD 界面间产生弱 MAPE 基质层影响复合材料的力学性能,即增容剂从 5% 到 7%,冲击强度略有降低,弯曲强度增势变缓。所以用 5% 的增容剂较为合适。

2.2.3 热压温度对油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能的影响

表 3~表 4 显示热压温度与复合材料的拉伸强

度显著相关^[24],但对拉伸强度的影响较小,不及壳粉含量,增容剂含量。当热压温度由 140 °C 提升到 160 °C 时,拉伸强度提高了 13.3%。温度会影响壳粉和塑料的黏合强度,温度升高使 PE-HD 流动性增加,在壳粉之间均匀渗透,使其充分黏结。如果温度过高,油茶果壳可能会分解导致强度降低^[15]。故热压温度确定为 160 °C。

2.2.4 热压时间对油茶果壳粉/PE-HD 复合材料力学性能的影响

分析表 3~表 4 可知,热压时间与复合材料的弯曲强度和拉伸强度显著相关,对弯曲强度的影响仅次于增容剂含量,对拉伸强度的影响较小。热压会对复合材料产生显著的变化效应^[25],随着热压时间延长,弯曲强度呈现先减小后增大的趋势,拉伸强度略微增加后降低。可能是壳粉凝聚导致应力集中,使复合材料产生缺陷。在适宜温度范围内,热压时间的延长使熔融塑料在壳粉中充分渗透,从而使复合材料的力学性能提高。但热压时间直接影响生产周期,考虑企业成本及生产效率,确定热压时间为 10 min。

3 结论

针对油茶果壳高值化利用难的现状,使用油茶果壳制备高填充油茶果壳基本塑复合材料,对复合材料的配方及工艺进行研究,制备出力学性能优良的高填充油茶果壳基本塑复合材料,得出以下结论:

(1) 当添加塑料为 PE-HD 时,高填充油茶果壳基本塑复合材料的弯曲强度最大为 34.40 MPa,拉伸强度最大为 18.20 MPa,综合力学性能较优。加入低密度塑料 PE-LD 或 PE-LLD 会导致复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量和拉伸强度降低。

(2) 当油茶果壳粉含量为 65% 时,添加 7%MAPE 的复合材料强度较好,弯曲强度最大为 33.66 MPa,弯曲弹性模量为 2 107 MPa,拉伸强度为 15.07 MPa,冲击强度为 2.71 MPa。

(3) 由正交实验得出优化制备参数组合为壳粉含量 55%,MAPE 含量 5%,热压温度 160 °C,热压时间 10 min。

参考文献

[1] CHEN H M, ZHAI Y B, XU B B, et al. Feasibility and comparative studies of thermochemical liquefaction of camellia oleifera cake in different supercritical organic solvents for producing bio-oil[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89:955-962.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022:393.
National bureau of statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022:393.

[3] ZHU J J, ZHU Y Y, JIANG F X, et al. An integrated process to produce ethanol, vanillin, and xylooligosaccharides from camellia oleifera shell[J]. Carbohydrate Research, 2013, 382:52-57.

[4] SINGH T, BISWAL A, MOR S, et al. A high-resolution emission inventory of air pollutants from primary crop residue burning over Northern India based on VIIRS thermal anomalies[J]. Environmental Pollution, 2020, 266. DOI:10. 1016/j.envpol.2020.115132.

[5] 刘雪梅, 陈嘉玮, 王宇航. 油茶壳活性炭的制备及应用研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(1):190-192, 210.
LIU Xuemei, CHEN Jiawei, WANG Yuhang. Research progress in preparation and application of camellia oleifera shell activated carbon[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(1):190-192, 210.

[6] ZHANG J P, YING Y, LI X L, et al. Physical and chemical properties of camellia oleifera shell composts with different additives and its maturity evaluation system[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27:35 294-35 302.

[7] ZHAO Y, SU R Q, ZHANG W, et al. Antibacterial activity of tea saponin from camellia oleifera shell by novel extraction method[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 153. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112604.

[8] 彭开元. 油茶果壳基本质复合材料的制备与性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
PENG Kaiyuan. Study on the preparation and properties of camellia oleifera abel fruit shells based wood composite materials[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.

[9] AYRILMIS N, BENTHIEN J T, THOEMEN H. Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2):325-331.

[10] 刘彬, 李彬, 王怀栋, 等. 木塑复合材料应用现状及发展趋势[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1):137-141.
LIU Bin, LI Bin, WANG Huaidong, et al. Application status and development trend of wood plastic composite[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):137-141.

[11] CHOUPANI C K, LIN X Y, GUAN L T, et al. Utilization of tea oil camellia (camellia oleifera abel.) shells as alternative raw materials for manufacturing particleboard[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 161. DOI:10.1016/j.indcrop.2020.113221.

[12] CHOUPANI C K, LIN X Y, GUAN L T, et al. Interaction between particle size and mixing ratio on porosity and properties of tea oil camellia (camellia oleifera abel.) shells-based particleboard[J]. Journal of Wood Science, 2022, 68(1). DOI: 10.1186/s10086-022-02052-3.

[13] CHOUPANI C K, LI Y T, LIN X Y, et al. Heat transfer efficiency and pMDI curing behavior during hot-pressing process of tea oil

- camellia (*camellia oleifera* abel.) shell particleboard[J]. *Polymers*, 2023, 15(4). DOI:10.3390/polym15040959.
- [14] 胡孔飞,马晓伟,莫小勤.油茶果壳碎料板制造工艺及其性能研究[J].*湖南林业科技*,2017,44(4):59-63.
HU Kongfei, MA Xiaowei, MO Xiaoqin. Study on process and performance of camellia shell particle board[J]. *Hunan Forestry Science Technology*, 2017, 44(4):59-63.
- [15] 吴昊,陈沛均,胡传双,等.油茶果壳对PE-HD力学性能的影响[J].*工程塑料应用*,2021,49(3):135-139.
WU Hao, CHEN Peijun, HU Chuanshuang, et al. Effects of camellia *oleifera* shell on mechanical properties of PE-HD[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(3):135-139.
- [16] 江太君,徐成,陈磊,等.木塑复合包装材料在线挤出计量及计量误差研究[J].*包装工程*,2018,39(11):133-136.
JIANG Taijun, XU Cheng, CHEN Lei, et al. Online extrusion measurement and measurement error for wood plastic packaging composites[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(11):133-136.
- [17] 刘鑫荣,孟令宇,马洪博,等.芦苇纤维用量对芦苇纤维/聚乙烯(PE)复合材料力学性能的影响[J].*吉林林业科技*,2023,52(4):31-34.
LIU Xinrong, MENG Lingyu, MA Hongbo, et al. Effect of reed fiber amount on mechanical properties of reed fiber/polyethylene (PE) composites[J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2023, 52(4):31-34.
- [18] 余旺旺,刘芹,杨晨,等.不同塑料基木塑复合材料的性能对比研究[J].*塑料工业*,2020,48(6):121-125.
YU Wang wang, LIU Qin, YANG Chen, et al. Comparative study on properties of different plastic-based wood composites[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48:121-125.
- [19] 赵方.竹塑复合材料制造关键技术研究[D].北京:北京林业大学,2012.
ZHAO Fang. Study on the key manufacture technology of bamboo plastic composites[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [20] BARBOS J D V, AZEVEDO J B, POLLYANA DA SILVA M C, et al. Development and characterization of WPCs produced with high amount of wood residue[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(5):9 684-9 690.
- [21] 王选伦,周宴宇,孟丽丽,等.一种高抗冲、高承载聚丙烯复合材料及制备方法和应用:CN202010112843.6[P]. 2020-05-19.
WANG Xuanlun, ZHOU Yanyu, MENG Lili, et al. Study on the preparation, application, and performance of a high impact-resistant and load-bearing polypropylene composite material: CN202010112843.6[P]. 2020-05-19.
- [22] 李洋.表面改性剂增强玻纤/木塑复合材料力学性能研究[J].*塑料科技*,2021,49(6):32-36.
LI Yang. Study on mechanical properties of glass fiber/wood plastic composites reinforced by surface modifier[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(6):32-36.
- [23] 胡玉安,何梅,宋伟,等.竹塑复合材料界面改性研究现状及展望[J].*江西农业大学学报*,2019,41(1):114-123.
HU Yu'an, HE Mei, SONG Wei, et al. Research status and development trend of interfacial modification of bamboo - plastic composite[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41 (1):114-123.
- [24] 肖晨琛.真空热压法制备连续单向碳纤维增强铝基层板复合材料组织及性能研究[D].南昌:南昌航空大学,2017.
XIAO Chenchen. Studies on microstructure and properties of continuous unidirectional carbon fiber reinforced aluminum laminate matrix composites prepared by vacuum heat-pressing process [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [25] 赵方,程海涛,张双保.竹塑复合材料的制备工艺及其性能研究[J].*林产工业*,2013,40(5):21-25.
ZHAO Fang, CHENG Haitao, ZHANG Shuangbao. Study on the preparation technology and properties of bamboo plastic composites[J]. *China Forest Products Industry*, 2013, 40(5):21-25.