

竹叶/HDPE 复合材料的制备及性能

查 瑶, 饶 俊, 关 莹, 张利萍, 高 慧

(安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:【目的】探讨竹叶和高密度聚乙烯(HDPE)制备竹叶基复合材料的可行性,以提高竹叶的附加值,实现竹叶废弃物的综合利用。【方法】以经乙醇提取后的毛竹 *Phyllostachys edulis* 叶为原料,HDPE 为增强基体,添加适量助剂,采用热压成型与注塑成型 2 种工艺制备竹叶/HDPE 复合材料。利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、热重分析仪(TGA)进行结构与性能的表征,探究不同成型工艺下不同竹叶质量分数对复合材料的性能影响。【结果】热分析结果表明:2 种工艺制备的竹叶/HDPE 复合材料热稳定性均随着竹叶质量分数的增加而提高。力学性能结果表明:随竹叶质量分数增加,注塑成型竹叶/HDPE 复合材料拉伸强度逐渐降低,抗拉模量逐渐增大;弯曲强度先增大后减小,当竹叶质量分数为 40%时,热压成型和注塑成型复合材料弯曲强度均达到最大,分别为 28.72 和 30.20 MPa。随竹叶质量分数增加,2 种工艺制备的复合材料弯曲模量逐渐增大,最大值分别为 1 564.92 和 1 696.15 MPa;冲击强度逐渐减小。【结论】相比而言,热压成型竹叶/HDPE 复合材料热力学性能更加稳定,是具有一定应用前景的、环境友好的新型材料。图 7 表 2 参 22

关键词: 材料学; 竹叶; HDPE; 复合材料; 热性能; 力学性能

中图分类号: S782.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)02-0343-07

Preparation and properties of bamboo leaf/HDPE composites

ZHA Yao, RAO Jun, GUAN Ying, ZHANG Liping, GAO Hui

(School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: [Objective] The research aim is to improve add value of bamboo leaves. [Method] Novel composites were prepared from ethanol treated bamboo leaves (*Phyllostachys edulis*) by both hot press molding and injection molding, using high density polyethylene (HDPE) as reinforcing agent and appropriate amount of additives. The structure and properties of the composite were characterized by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis (TGA), and the effects of different contents of bamboo leaves on the properties of composites by the two different molding processes were investigated. [Result] Thermal analysis results showed that the thermal stability of the composites prepared by the two different molding processes increased with the increase of the relative content of bamboo leaves. Mechanical property results indicated that the tensile modulus of composite prepared by injection molding also increased with the increase of the content of bamboo leaves, while the tensile strength decreased. When the content of bamboo leaves increased, the bending strength of the composite increased first and then decreased. The maximum bending strength of the composites obtained by hot press molding and injection molding reached 28.72 and 30.20 MPa when the bamboo leaf content was 40%. The bending modulus of composites obtained by hot press molding and injection molding increased with the increase of the content of bamboo leaves, and the maximums reached 1 564.92 and 1 696.15 MPa, respectively. The impact strength

收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-09-03

基金项目: “十三五”国家重大研发计划项目(2017YFD0600805-1); 安徽省自然科学基金资助项目(1808085MC68); 安徽省 2018 年度重点研究与开发计划项目(1804g07020168)

作者简介: 查瑶, 从事生物质材料高值化利用研究。E-mail: 602310zylky@my.com。通信作者: 高慧, 教授, 从事生物质材料高值化利用研究。E-mail: huigaosz@163.com

gradually decreased with the increase of the bamboo leaf content. [Conclusion] In contrast, the hot pressed bamboo leaf/HDPE composite had more stable thermal properties, and could be a new environmentally friendly material. [Ch, 7 fig. 2 tab. 22 ref.]

Key words: material science; bamboo leaf; HDPE; composite; thermal property; mechanical property

能源匮乏和资源紧缺是当今社会面临的重要问题,寻找并开发可再生、生长周期短且对环境友好的生物质资源成为当前研究的热点。中国竹林资源丰富,竹林落叶数量极大。多数竹林落叶腐烂后被制成优质有机肥,作为畜类饲料或微生物培养基的原料,也有部分研究者从竹叶中提取黄酮类化合物和生物活性多糖等成分应用于医药行业^[1-3],实现了竹林落叶的部分资源化。但是处理后的竹叶剩余物开发十分贫乏,或作为燃料燃烧,或直接掩埋丢弃成为废弃物,不仅造成环境污染,还造成了竹叶资源的极大浪费。本研究以乙醇提取后的毛竹 *Phyllostachys edulis* 竹叶剩余物为原料,以高密度聚乙烯(HDPE)为增强基体,添加适量助剂制备复合材料,一方面有利于保护森林资源,实现竹叶废弃物的综合利用,对环境保护以及缓解当前木材日趋紧张的压力具有十分重要的意义^[4],另一方面探讨竹叶和 HDPE 制备竹叶基复合材料的可行性,提高竹叶的附加值,为实现竹叶资源的高效利用和探索新型材料提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 实验材料

经体积分数为 70%乙醇提取多糖及黄酮类化合物后的竹叶(60 目以下,安徽省金寨县),置于 105 °C烘箱中干燥处理备用;HDPE 购自东莞保裕塑胶原料有限公司;复合润滑剂和马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)均购买于上海光裕化工有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计 采用单因素变量分析。竹叶和 HDPE 按不同质量比混合,加入质量分数为 2%的复合润滑剂和 2%的马来酸酐接枝聚乙烯。按照工艺条件注塑成型和热压成型,根据复合材料中竹叶质量分数,将热压成型制备的复合材料编号为 HE1(20%竹叶)、HE2(30%竹叶)、HE3(40%竹叶)、HE4(50%竹叶)、HE5(60%竹叶)、HE6(70%竹叶),注塑成型复合材料编号为 IM1(20%竹叶)、IM2(30%竹叶)、IM3(40%竹叶)、IM4(50%竹叶)、IM5(60%竹叶)。

1.2.2 试样制备 干燥后的竹叶和 HDPE 按照上述配比倒入高速混料机(SHR-25A,张家港市嘉华塑料机械有限公司)中,转速 $400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,共混 10 min。混合后的物料倒入双螺旋挤出机(SWMSZ-SI,南京赛旺科技发展有限公司)中共混造粒,转速为 $400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,造粒一至五区的温度分别为 150、165、165、160、145 °C。混合物料的同时进行破碎,将破碎后的物料倒入注塑机(HYF-500,宁波海鹰塑料机械制造有限公司)注塑成标准试样,注塑机温度为 180 °C,压力为 10 MPa。同时,取预混料粒均匀铺装到模具中,在平板硫化机(XLb,青岛亚东橡塑机械有限公司)中预热 10 min,升温至设定温度 170 °C后,加压至 5 MPa,保压 5 min,冷压 10 min。试样脱模后根据所需尺寸进行切割加工。

1.3 竹叶/HDPE 复合材料的表征及力学测试

采用傅里叶红外光谱仪(Bruker,德国)测定并分析原料和复合材料的化学结构,原料采用 KBr 压片,热压成型复合材料在 ATR 模式下测定,波数 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。采用 XRD-6000 X 射线衍射仪(岛津,日本京都)分析原料和复合材料的结晶结构,辐射源波长为 0.154 nm,电压 36 kV,电流 30 mA,扫描速度为 $2^\circ\cdot\text{min}^{-1}$, 2θ 为 $5^\circ\sim 60^\circ$ 。将复合材料放入液氮中淬断,采用扫描电子显微镜(Hitachi S-4800,日本)观察复合材料表面及断面形貌。竹叶、HDPE 及复合材料的热稳定性采用热重分析仪(TGA 209F3)(NETZSCH,德国)测定:称取 10 mg 的样品,放入氧化铝坩埚中,温度是 30~700 °C,加热速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。此外,所有样品在 100 °C保温 10 min 以除去样品中的水分,氮气流量为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

力学性能:拉伸性能参照塑料拉伸性能测定的国标(GB/T 1040.5-2008),采用微机控制电子式万能试验机(WDW-1002,济南时代试金试验机有限公司)进行测试;冲击性能参照塑料悬梁臂冲击强度测定的国标(GB/T 1843-2008),采用悬梁臂冲击试验机(XJUD-5.5,上海皆准仪器设备有限公司)进行测试;弯曲性能参照纤维增强塑料弯曲性能实验方法的国标(GB/T 1449-2005),采用高精度双立柱万能力

学试验机(AG-X plus, 日本岛津)测试。重复 5 次·试样⁻¹, 取平均值。

2 结果与分析

2.1 竹叶、HDPE 及复合材料的红外光谱分析

2 种工艺制备的竹叶/HDPE 复合材料原材料和造粒批次相同, 因而具有相同红外光谱图。3 342 cm⁻¹ 处吸收峰主要是竹叶纤维素和半纤维素中的羟基产生, 1 724 cm⁻¹ 附近的羰基特征峰归属于竹叶半纤维素中的乙酰酯羰基和木质素中的羰基醛^[5], 1 000~1 200 cm⁻¹ 的特征峰则是 C—O、C—O—C 键伸缩振动造成^[6](图 1A); 相应地, 图 1B 中 3 342、1 465、1 034 cm⁻¹ 处出现明显的纤维素特征峰^[7]。图 1A 中 2 931 和 2 843 cm⁻¹ 处主要为 HDPE 的甲基与亚甲基中的 C—H 伸缩振动峰; 相应地, 图 1B 中 2 931 和 2 843 cm⁻¹ 处也存在伸缩振动峰; 随着竹叶的增加, 这些峰值强度逐渐减弱, 主要归因于 HDPE 含量降低。说明复合材料在成型过程中没有生成新基团, 2 种工艺制备过程中材料未发生化学反应。

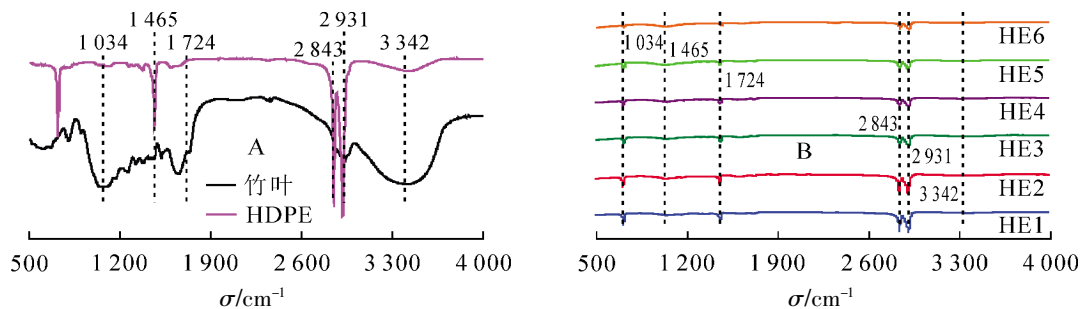


图 1 竹叶、HDPE 及复合材料的红外光谱

Figure 1 FT-IR spectra of bamboo leaf, HDPE and its composite

2.2 竹叶、HDPE 及复合材料的 X 射线衍射分析

2 种工艺制备的竹叶/HDPE 复合材料原材料相同, 造粒批次相同, 因而具有相同的 X 射线衍射光谱图。如图 2A 所示: $2\theta=22.63^\circ$ 处和 $2\theta=25.12^\circ$ 处出现大且尖利的强衍射峰。其中 $2\theta=22.63^\circ$ 处特征峰归属于竹纤维(002)结晶衍射峰^[8]和 HDPE(110)结晶衍射峰^[9], $2\theta=25.12^\circ$ 处的衍射峰归属于 HDPE(200)结晶衍射峰^[10]。Jade 软件计算得到 HDPE 的相对结晶度为 69.46%, HE1、HE2、HE3、HE4、HE5 和 HE6 的相对结晶度依次为 45.70%、45.15%、41.79%、32.61%、23.48%、13.62%; 由此认为: 随着竹叶质量分数的增加, 热压成型复合材料结晶度依次下降; 这可能是竹叶质量分数的增加导致复合材料的无定型区域增大所致。由图 2B 可知: 复合材料保留了竹叶和 HDPE 的原有特征峰, 没有生成新的特征衍射峰; 说明在成型过程中, 复合材料没有生成新的结晶结构。

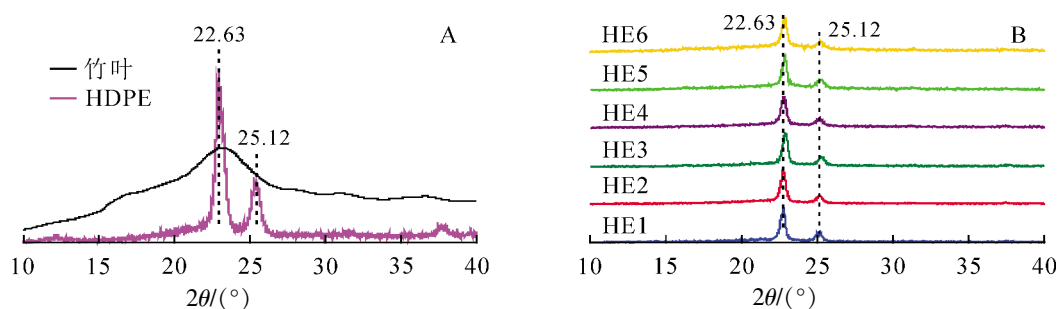


图 2 竹叶、HDPE 和复合材料的 XRD 衍射光谱

Figure 2 XRD patterns of HDPE, bamboo leaf and its composite

2.3 竹叶、HDPE 及复合材料的热重分析

对竹叶和 HDPE 的热稳定性分析发现: 随温度升高, 竹叶热解并出现 2 个失重峰(图 3A, 图 3B), 分别在 290 和 345 ℃处; HDPE 仅 1 个失重峰, 在 477 ℃处; 至 700 ℃时, 竹叶残余质量为 28.90%, HDPE 残余质量为 1.16%(表 1)。

热压成型复合材料整个热解过程可分为 3 个阶段(图 3C); 260~286 ℃为第 1 阶段, 竹叶中半纤维素

开始降解,对应 DTG 图谱出现 1 个失重峰(图 3D); 286~343 ℃为第 2 阶段,纤维素和木质素降解,是该阶段失重的主要原因^[11]; 343~474 ℃为第 3 阶段,此时复合材料急剧失重^[12],主要是 HDPE 发生热解,DTG 图谱出现热能较大失重峰,最大失重速率出现在 474 ℃处;而残余木质素持续降解^[11]。温度高于 474 ℃后,质量几乎不变,TG 曲线的热解速率曲线趋于平缓^[12]。具体来看,当竹叶质量分数为 20% 时(HE1),热解残余质量分数为 2.67%,当竹叶质量分数 70% 时(HE6),热解残余质量分数为 21.71% (表 1);显然,竹叶/HDPE 复合材料的残余质量受竹叶质量分数的影响。同时,DTG 图形中的峰面积与复合材料失重率成正比^[13-14],由表 1 可知:随着竹叶质量分数的增加,峰面积值逐渐减小,即失重率降低,热压成型复合材料热学性质越来越稳定。

注塑成型竹叶/HDPE 复合材料的热解过程也分为 3 个阶段。第 1 阶段 260~288 ℃,第 2 阶段 288~344 ℃,第 3 阶段 344~475 ℃。由图 3E 可知:当竹叶质量分数为 20% 时,复合材料热解残余质量分数为 2.86%,当竹叶质量分数 60% 时,残余质量分数为 18.22%,与热压成型规律相同;即随着竹叶质量分数的增加,竹叶/HDPE 复合材料的热能残余质量分数随之增加。由于工艺制备原料、批次组分相同,注塑成型复合材料失重峰对应的挥发分成分与热压成型也相同(图 3F),即峰面积值随着竹叶质量分数的增加而减小,热稳定性逐渐增强。

2.4 竹叶/HDPE 复合材料的力学性能分析

2.4.1 弯曲性能 由图 4A 和表 2 可知:随着竹叶质量分数的增加,复合材料弯曲强度呈现先增大后降低的趋势。当竹叶质量分数为 40% 时,注塑成型和热压成型复合材料弯曲强度均达到最大值(30.20 和

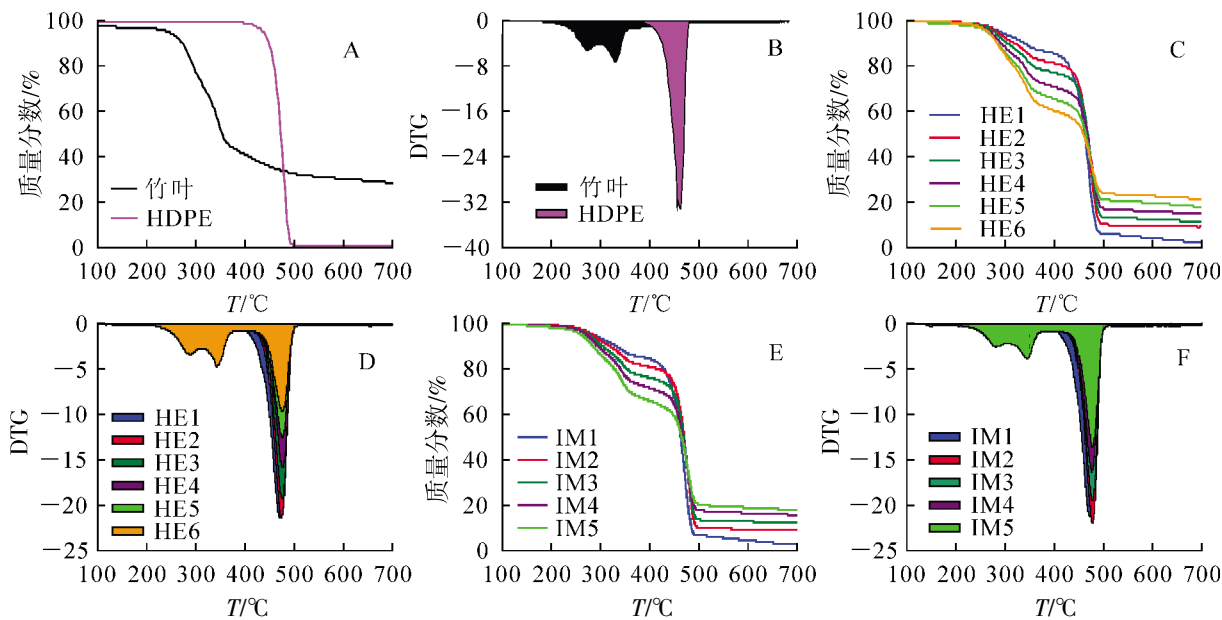


图 3 竹叶、HDPE 及复合材料 TG、DTG 曲线

Figure 3 TG and DTG curve of bamboo leaf, HDPE and its composite

表 1 竹叶/HDPE 复合材料的热重分析

Table 1 TG analysis of bamboo leaf/HDPE composites

材料 编号	起始分 解温度/ ℃	第 1 失 重峰峰 值/℃	第 2 失 重峰峰 值/℃	第 3 失 重峰峰 值/℃	700 ℃残 余质量 分数/%	相对峰 面积	材料 编号	起始分 解温度/℃	第 1 失 重峰峰 值/℃	第 2 失 重峰峰 值/℃	第 3 失 重峰峰 值/℃	700 ℃残 余质量 分数/%	相对峰 面积
竹叶	261	290	345	—	28.90	712.25	HE6	259	283	341	475	21.71	784.42
HDPE	455	—	—	477	1.16	999.82	IM1	260	289	344	471	2.86	863.08
HE1	259	290	345	469	2.67	974.37	IM2	260	290	344	476	9.21	850.09
HE2	261	289	346	473	9.41	907.43	IM3	261	289	344	476	12.53	792.58
HE3	259	289	343	475	11.59	884.69	IM4	260	284	343	475	15.97	743.07
HE4	260	284	343	475	14.93	850.40	IM5	258	286	344	476	18.22	690.63
HE5	260	282	339	475	18.01	818.81							

说明: “—” 表示未检出

28.72 MPa)；竹叶质量分数超过 40%时，弯曲强度明显下降，这可能是因为过量竹叶影响了与 HDPE 的界面结合强度，竹叶纤维相互作用力加强，使得塑料基体间的团聚现象加剧，一旦受到外力，易引起应力集中且增大发生缺陷的概率^[15]。由图 4B 和表 2 可知：复合材料弯曲模量随着竹叶质量分数的增加而增大，2 种工艺制备的复合材料弯曲模量最大值分别为 1 564.92 和 1 696.15 MPa。这主要是由于竹叶纤维具有较强的比强度和比刚度^[16]。成型工艺会影响竹叶和 HDPE 基体之间的界面黏结，相比之下，热压成型使得竹叶具有更明显的团聚倾向，这些团聚点很容易引起应力集中^[17]，导致竹叶/HDPE 复合材料弯曲强度降低，力学性能下降。因此，注塑成型工艺制备的复合材料弯曲强度和弯曲模量提高更加明显。

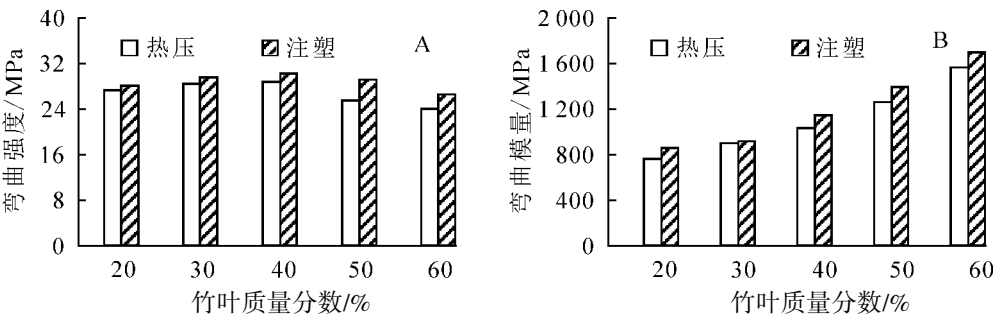


图 4 竹叶/HDPE 复合材料弯曲性能

Figure 4 Bending strength and flexural modulus curve of bamboo leaf /HDPE composites

表 2 竹叶/HDPE 复合材料力学强度

竹叶质量 分数/%	热压成型			注塑成型				
	弯曲强度/ MPa	弯曲模量/ MPa	冲击强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	拉伸模量/ MPa	弯曲强度/ MPa	弯曲模量/ MPa	冲击强度/ MPa
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
20	27.35	767.64	28.15	27.93	165.94	28.05	848.44	17.32
30	28.44	900.77	20.36	27.21	225.59	29.48	922.33	14.63
40	28.72	1 024.38	16.86	26.75	259.19	30.20	1 147.15	13.31
50	25.43	1 250.67	14.52	26.75	301.76	29.31	1 391.94	11.03
60	24.04	1 564.92	12.63	—	—	26.85	1 696.15	9.82

说明：“—”表示未检出

2.4.2 拉伸性能 以注塑成型的竹叶/HDPE 复合材料为例研究其拉伸性能。随着竹叶质量分数增加，复合材料拉伸强度降低(图 5)。这可能是因为随着竹叶纤维数量的增多，用于延伸的聚合物基体数量减少，拉伸时聚合物的完整性易受到破坏；亲水性的竹叶纤维与疏水性的 HDPE 互不相容，分散力变大^[5]，即竹叶纤维与 HDPE 的黏结性降低^[18]。复合材料的拉伸模量主要取决于纤维取向、纤维含量和纤维与基体之间的结合力^[18]。随着竹叶质量分数增加，竹叶纤维承受主要应力，塑料基体则传递应力，因此拉伸模量随竹叶质量分数增加，复合材料力学性能由此得到提升^[19]。结果与 KOKTA 等^[20]研究一致。

2.4.3 冲击性能 由图 6 可知：随着竹叶质量分数的增加，2 种工艺制备的复合材料冲击强度均逐渐下降。复合材料的冲击强度与竹叶纤维、塑料基体的黏结性有关^[21]。对注塑成型复合材料的扫描电镜图观察发现，竹叶质量分数 20%的复合材料中(图 7A)，竹叶与 HDPE 分散效果良好，冲击性能较理想，结合强度较高；当竹叶质量分数升至 50%时(图 7B)，扫描电镜清晰可见大量竹叶纤维聚集，形成不均一的分散体系；说明此时竹叶过量，复合材料中竹叶分散效果降低，两相界面相互作用变弱^[5]，复合材料的韧性降低，冲击强度也持续下降^[22]。热压成型复合材料的扫描电镜观察发现，竹叶质量分数由 20%(图 7C)升至 50%(图 7D)，所得的复合材料均混合均匀，未见明显的竹叶纤维团聚，说明竹叶与 HDPE 结合效果更加理想、紧密，即相比注塑成型，热压成型所得复合材料冲击强度更大。

3 结论

2 种制备工艺下，竹叶/HDPE 复合材料化学性质和热学性质均较稳定。随竹叶质量分数增加，复合体系中未发生化学反应且未生成新的结晶结构；2 种工艺制备的竹叶/HDPE 复合材料弯曲性能均呈先增

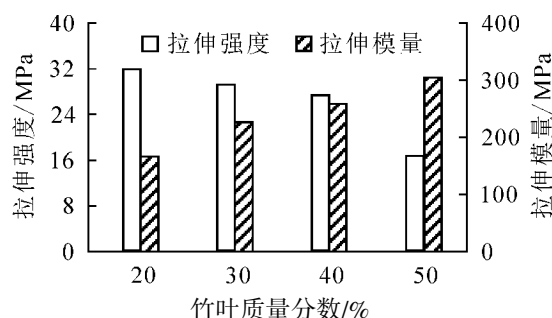


图5 注塑成型竹叶/HDPE复合材料的抗拉强度和抗拉模量

Figure 5 Tensile strength and tensile modulus curve of bamboo leaf /HDPE composite injection moldings

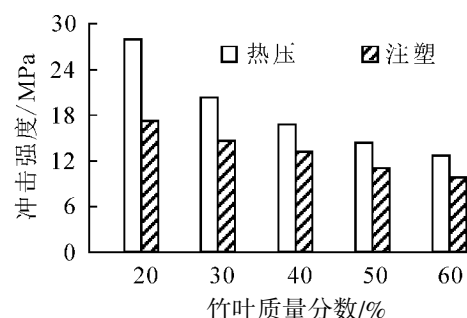


图6 竹叶/HDPE复合材料冲击强度

Figure 6 Impact strength curve of bamboo leaf/HDPE composites

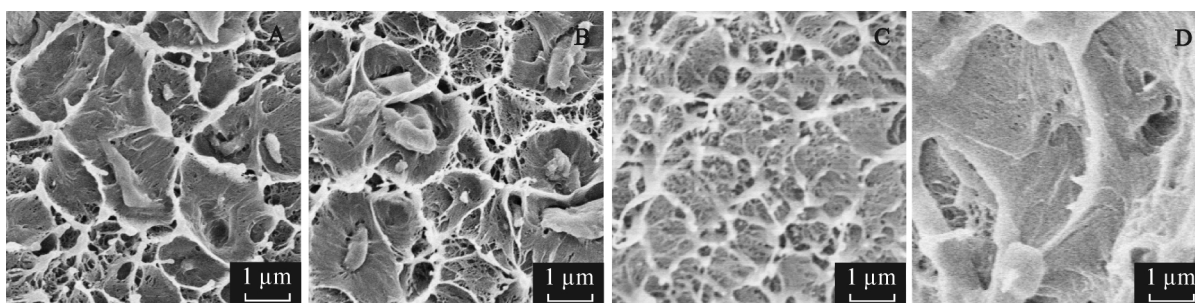


图7 不同工艺成型的竹叶/HDPE复合材料扫描电镜

Figure 7 SEM of bamboo leaf /HDPE composites of injection molding and hot pressing

大后减小的趋势；当竹叶质量分数为40%时，2种工艺下制备的的复合材料弯曲性能均达到最佳；弯曲模量均逐渐增大。注塑成型的竹叶/HDPE复合材料的抗拉模量随竹叶质量分数的增加而逐渐增大，热压成型的竹叶/HDPE复合材料具有更大冲击强度。综上，热压成型的复合材力学性能优于注塑成型。热压成型竹叶/HDPE复合材料是具有更高比强度、更大比刚度且对环境友好的新型材料。

4 参考文献

- [1] 魏琦. 苦竹属竹叶化学成分及其生物活性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
WEI Qi. *Chemical Components and Biological Activites of Pleioblastus Nakai Leaves* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [2] 陈烨. 淡竹叶化学成分与药理作用研究进展[J]. 亚太传统医药, 2014, 10(13): 50 – 52.
CHEN Ye. Review on research of the chemical constituents and pharmacological activities of *Lophatherum gracile* Brongn [J]. *Asia-Pacific Tradit Med*, 2014, 10(13): 50 – 52.
- [3] 任美玲. 竹叶多糖的提取制备及生物活性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
REN Meiling. *Study on Isolation, Preparation and Biological Activity of Bamboo Leaves Polysaccharides* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [4] 杨守禄, 罗莎, 章磊, 等. 木塑复合材料功能化改性研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 3090 – 3098.
YANG Shoulu, LUO Sha, ZHANG Lei, et al. An overview on functionalization modification of wood-plastic composites [J]. *Mater Rev*, 2018, 32(9): 3090 – 3098.
- [5] RAHMAN M R, HAMDAN S, HASHIM D M A, et al. Bamboo fiber polypropylene composites: effect of fiber treatment and nano clay on mechanical and thermal properties [J]. *J Vinyl Addit Technol*, 2015, 21(4): 253 – 258.
- [6] 惠冬雪. 玉米秸秆皮/高密度聚乙烯复合材料吸湿特性及抗微生物性能[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
HUI Dongxue. *Moisture Sorption and Anti-Biological Performances of Corn Stalk Fiber/High-density Polyethylene Composites* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [7] 杨小旭, 庞浩, 张容丽, 等. 竹粉热化学液化的在线红外光谱分析[J]. 应用化学, 2009, 26(2): 187 – 192.
YANG Xiaoxu, PANG Hao, ZHANG Rongli, et al. Study of liquefaction of bamboo in glycol by Realtime IR [J]. *Chin*

- J Appl Chem*, 2009, **26**(2): 187 – 192.
- [8] 何建新, 章伟, 王善元. 竹纤维的结构分析[J]. 纺织学报, 2008, **29**(2): 20 – 24.
HE Jianxin, ZHANG Wei, WANG Shanyuan. Analyzing the structure of bamboo fiber [J]. *J Tex Res*, 2008, **29**(2): 20 – 24.
- [9] FEI Peng, FEI Benhua, YU Yan, *et al.* Thermal properties and crystallization behavior of bamboo fiber/high-density polyethylene composites: Nano-TiO₂ effects [J]. *J Appl Polymer Sci*, 2013, **131**(3): 1082 – 1090.
- [10] 严小伟. 核磁共振技术对固体高聚物及其复合材料结构非均匀性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
YAN Xiaowei. *Heterogeneous Structure of Solid Polymer and Polymer Composites Investigated by Nuclear Magnetic Resonance Techniques* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [11] 马承愚, 林长青, 牛耀岚. 废弃麻制备活性炭热解过程的动力学研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, **28**(6): 818 – 822.
MA Chenyu, LIN Changqing, NIU Yaolan. The research on kinetics of pyrolysis progress of activated linen fabric waster [J]. *J Nat Sci Heilongjiang Univ*, 2011, **28**(6): 818 – 822.
- [12] 羨瑜, 李海栋, 王翠翠, 等. 壳层组分对芯壳结构竹塑复合材料热解特性的影响[J]. 中国塑料, 2018, **23**(1): 51 – 58.
XIAN Yu, LI Haidong, WANG Cuicui, *et al.* Effect of shell composition on pyrolysis kinetics characteristics of core-shell structured bamboo plastic composites [J]. *China Plastics*, 2018, **23**(1): 51 – 58.
- [13] 段锐. 典型生物质热解及其动力学研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2016.
DUAN Rui. *Typical Biomass Pyrolysis and Its Dynamics Research* [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2016.
- [14] 郑少明. 基于热分析技术对纺织纤维热学性能的研究[J]. 天津纺织科技, 2018(1): 28 – 30
ZHENG Shaoming. Research on thermal property of textile fiber based on thermal analysis [J]. *J Tianjin Text Sci Technol*, 2018(1): 28 – 30.
- [15] 余方兵, 宋剑斌, 吴秋宁, 等. 竹粉接枝改性提高竹塑复合材料的力学性能[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(23): 79 – 85.
YU Fangbing, SONG Jianbin, WU Qiuning, *et al.* Bamboo flour modifying by grafted improved mechanical property of bamboo-plastic composites [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29**(23): 79 – 85.
- [16] 王兵. 纤维柱增强复合材料夹芯结构的制备工艺及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Bing. *Preparation and Mechanical Properties of Fiber Column Reinforced Composite Sandwich Structures* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] NAM T H, OGIHARA S, NAKATANI H, *et al.* Mechanical and thermal properties and water absorption of jute fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites [J]. *Adv Compos Mater*, 2012, **21**(3): 241 – 258.
- [18] NAM T H, OGIHARA S, TUNG N H, *et al.* Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites [J]. *Compos Part B Eng*, 2011, **42**(6): 1648 – 1656.
- [19] 付东, 徐炳强, 徐才华, 等. 热压成型和注塑成型 CF/PP 复合材料的力学性能对比[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2014, **12**(5): 68 – 71.
FU Dong, XU Bingqiang, XU Caihua, *et al.* Comparison of mechanical properties of carbon fiber/polypropylene composites prepared by hot compression molding and injection molding [J]. *Chem Propellants Polym Mater*, 2014, **12**(5): 68 – 71.
- [20] KOKTA B V, RAJ R G, DANEALULT C. Use of wood flour as filler in polypropylene: studies on mechanical properties [J]. *Polym-Plast Technol Eng*, 1989, **28**(3): 247 – 259.
- [21] MYLSAMY K, RAJENDRAN I. Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short Agave fibre reinforced epoxy composites [J]. *Mater Design*, 2011, **32**(8/9): 4629 – 4640.
- [22] 曾广胜, 徐成, 谢桂容, 等. 植物纤维增强 PS 木塑复合材料的性能研究[J]. 包装学报, 2011, **3**(2): 20 – 24.
ZENG Guangsheng, XU Cheng, XIE Guirong, *et al.* Study on mechanical properties of fiber reinforced PS composites [J]. *Pack J*, 2011, **3**(2): 20 – 24.