

不同生物质纤维及其添加量对 PBAT 复合材料结构与性能的影响

谢良科^{1,2}, 黄骏成², 龚泽威², 那海宁^{1,2}, 朱锦²

(1.浙江工业大学 化学工程学院, 杭州 310014; 2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 浙江省生物基高分子材料技术与应用重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: **目的** 将生物质纤维材料芦苇、黄麻和纸浆引入聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) 中, 通过高速共混机制备高性能的硬质可生物降解复合材料。**方法** 研究不同生物质纤维及其添加量对复合材料结构、性能、生物降解性的影响。**结果** PBAT/生物质纤维复合材料的弯曲模量和强度得到明显提升。在 3 种复合材料中, PBAT/纸浆复合材料表现出最佳的力学性能和热稳定性, 通过简单混合 PBAT 和质量分数为 60% 的纸浆, 其弯曲模量、弯曲强度可分别达到 (1 055±35)、(12.46±1.10) MPa。降解试验结果表明, 复合材料的降解速率显著高于 PBAT 的降解速率, 并且与生物质纤维的吸水性及尺寸有关。**结论** 经大尺寸生物质纤维填充 PBAT 得到的硬质可降解复合材料的综合性能优异, 为发展绿色可降解硬质包装及包装填充物材料提供了科学思路和技术依据。

关键词: PBAT; 生物质纤维; 复合材料; 生物降解

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)23-0025-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.004

Effects of Different Biomass Fibers and Their Content on the Structure and Properties of PBAT Composites

XIE Liang-ke^{1,2}, HUANG Jun-cheng², GONG Ze-wei², NA Hai-ning^{1,2}, ZHU Jin²

(1. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Key Laboratory of Bio-based Polymeric Materials of Zhejiang Province, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Zhejiang Ningbo 315201, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the biomass fiber materials such as reed, pulp and jute into Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT) to prepare high-performance rigid biodegradable composites by a high-speed blender. The effects of different biomass fibers and their content on the structure, properties and biodegradability of the composites were investigated. The bending modulus and strength of the PBAT/biomass fibers composite were significantly improved. Among the three composites, the PBAT/pulp composite showed the best mechanical properties and thermal stability. For the PBAT-doped pulp with a 60% mass fraction, the bending modulus and bending strength reached (1055±35)MPa and (12.46±1.1)MPa. The degradation test showed that the degradation rate of the composite was significantly higher than that

收稿日期: 2022-06-27

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-ST-S-QYZD-2021-16-002); 中国科学院国际伙伴计划“一带一路”专题项目 (174433KYSB20190082); 国家自然科学基金 (21978310); 宁波市公益类科技计划重点项目 (2021S020)

作者简介: 谢良科 (1998—), 男, 硕士生, 主攻生物基可降解高分子复合材料。

通信作者: 那海宁 (1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为生物质转化利用及环境友好高分子复合材料。

of PBAT, which was related to the water absorption and size of the biomass fibers. The rigid biodegradable composites obtained by filling PBAT with large size biomass fibers have excellent comprehensive performance, which provides scientific ideas and technical basis for the development of green biodegradable rigid packaging and packaging filler materials.

KEY WORDS: PBAT; biomass fibers; composites; biodegradable

包装材料是保护商品且方便流通的重要材料,在生产、生活中不可或缺。随着包装行业的快速发展,包装材料的消耗量显著提高。由传统塑料制备的包装材料存在不可降解,使用废弃后容易造成严重污染,对人类社会可持续发展会产生巨大威胁等问题,需要对包装材料的降解属性进行改变^[1-4]。

在诸多可降解高分子材料中,聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)作为具有良好发展前景的共聚酯,不仅具有良好的可加工性、延展性、断裂伸长率、热稳定性和冲击性能,还可在微生物的作用下完全降解为 H₂O 和 CO₂ 等无害物质,备受人们青睐。如能以 PBAT 代替传统塑料用于包装材料的设计制备,就能缓解环境污染问题^[5-6]。尽管 PBAT 在膜袋等包装材料领域的应用已经取得了一定进展,但其仍存在成本高、强度低、模量低等不足,在硬质包装及包装填充物等方面存在一定的局限性^[7-10]。

近年来,随着我国“双碳”目标的提出,围绕由植物经光合作用吸收二氧化碳得到生物质的转化利用受到广泛关注,对推动节能减排和低碳发展具有重要作用^[11-12]。生物质纤维在聚合物复合材料中常被用作填料,如采用矮棕榈^[13]、玉米秸秆^[14]、咖啡壳^[15]等制成的粉末状填料(几十微米)与 PBAT 进行填充复合。虽然这些粉末状生物质纤维能够用于 PBAT 的改性,但是填料的粉末化破坏了生物质中固有植物纤维的结构,使得其对材料强度、模量的提升作用有限。部分研究通过特殊加工工艺采用少量几百微米至几毫米级的生物质纤维来增强 PBAT,结果表明,复合材料的力学性能得到了较大的提高^[16-18]。由此可见,以大尺寸、高含量的生物质纤维填充制备的 PBAT 复合材料对发展硬质可降解包装材料具有良好的前景。

文中采用大尺寸芦苇、黄麻和纸浆等生物质纤维与 PBAT 通过高速共混机制备高性能的硬质可降解复合材料,探索这些生物质纤维材料的种类及填充量(尤其是高含量填充)对 PBAT/生物质纤维复合材料力学、物理和热等性能的影响。同时,在土壤环境下对复合材料的生物降解性进行分析。

1 实验

1.1 原料及设备

主要材料:PBAT (TH801T),新疆蓝山屯河化

工股份有限公司;芦苇,长度约为 6 030 μm,直径约为 770 μm,纵横比约为 8;黄麻,长度约为 7 010 μm,直径约为 320 μm,纵横比约为 22;纸浆,长度约为 920 μm,直径为 17 μm,纵横比约为 54,潍坊云鼎新材料科技有限公司从中国山东省东营市采集;土壤,用于土埋实验的土壤购自山东滨州。

主要仪器:YK-10L 高速搅拌机,潍坊云鼎新材料科技有限公司;SJ100-13-1 双螺杆挤出机,南京杰亚挤出设备有限公司;DYW800 注塑机,宁波德亚塑料机械有限公司;DR-5U 平板硫化机,扬州德瑞仪器设备有限公司;Cary660+620 傅里叶变换红外光谱,美国 Agilent 公司;EV018 扫描电子显微镜,德国 Zeiss 公司;TGA/DSC1 热重分析仪,中国 Mettler-Toledo 公司;TGA/DSC1 差示扫描量热仪,中国 Mettler-Toledo 公司;D8 DISCOVER 高功率旋转靶式多晶 X 射线衍射仪,德国布鲁克公司;CMT 4304 万能材料试验机,中国珠海三思泰杰公司。

1.2 PBAT/生物质纤维复合材料的制备

将 PBAT 和生物质纤维置于真空烘箱中在 80 °C 下干燥 24 h,以除去其水分。然后使用高速共混机将质量分数为 30%和 60%的生物质填料与 PBAT 混合,将混合速度控制在 2 800 r/min。当温度上升至 160 °C 时,混合过程自动结束,混合过程持续时间约为 45 s。混合完成后,通过双螺杆挤出机进一步混合 PBAT 混合物,并切粒,最后使用平板硫化机在 175 °C 条件下将 PBAT/生物质纤维材料复合材料热压为标准样品,并参照 GB/T 9341—2008 进行下一步测试。

1.3 PBAT/生物质纤维复合材料的表征

用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析 PBAT 及其复合材料的表面化学结构,扫描范围为 4 00~4 000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 32。

通过扫描电子显微镜(SEM)观察 PBAT 及其复合材料的断面形态,研究 PBAT/生物质纤维材料复合材料的微观结构和生物质纤维材料在 PBAT 中的分散情况。扫描电镜图像是在室温、加速电压 20 kV 下获得,为了提高样品的导电性,在测试前对样品表面进行了 120 s 喷铂处理。

热稳定性通过热重分析仪(TGA)测量。测试条件:样品质量为 5~10 mg,氮气环境。以加热速率 20 °C/min 将温度从 30 °C 升至 800 °C,并记录 TGA 曲线。

热性能通过差示扫描量热仪 (DSC) 测量。测试条件: 氮气流量为 50 mL/min。首先以加热速度 10 °C/min 将材料的温度从 25 °C 加热至 160 °C, 然后保持 3 min, 以消除热历史。之后以 10 °C/min 的速度将材料冷却到 -50 °C, 保持 3 min, 再以 10 °C/min 重新加热至 160 °C。玻璃化转变温度(t_g)、熔融温度(t_m)和熔化焓(ΔH_m)由加热曲线得出, 结晶温度(t_c)则由冷却曲线得出。复合材料的结晶度可以通过熔化焓计算, 如式 (1) 所示。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{w \times \Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为 DSC 加热曲线上的熔化焓; ΔH_m^0 为 100% 结晶的 PBAT 的理想熔化焓; w 为复合材料中 PBAT 的质量分数。

PBAT 及其复合材料的结晶性能采用高功率旋转靶式多晶 X 射线衍射仪测量, 扫描范围为 5°~60°, 扫描时间为 10 min。弯曲性能按照 GB/T 9341—2008 的试验方法, 用万能材料试验机进行测试, 跨度距离为 64 mm, 十字头速度为 2 mm/min。

将 PBAT 及其复合材料切割成尺寸为 2 cm×2 cm×0.4 cm 的样品进行吸水性实验, 首先将样品在真空烘箱中干燥, 直至质量恒定, 记录此时的质量 m_0 , 将材料放入装有相同质量水的烧杯中。每隔一段时间取出样品, 用纸巾擦干后称量, 记录此时的质量 m_n , 持续 48 h。吸水率通过式 (2) 计算。

$$\text{吸水率} = \frac{m_n - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

1.4 土埋降解试验

将上述制备的复合材料在 80 °C 烘箱中烘干, 直

至质量恒定, 并记录称量结果, 然后置于装有土壤的容器中, 并用塑料薄膜覆盖, 土埋深度上下各为 7 cm, 并且保持土壤的相对湿度为 50%~60%, 在室温的条件下进行降解实验。在土埋期间, 通过土壤湿度仪控制湿度, 所有材料均埋于土壤中 150 d, 每 30 d 从土壤中挖出一批样品, 用水冲洗干净, 并于 80 °C 烘箱中烘干, 至质量恒定后称量。通过其重量损失计算材料的生物降解程度。

2 结果与分析

2.1 力学性能

PBAT 及其与芦苇、黄麻和纸浆复合材料 (文中记为生物质纤维-30%或生物质纤维-60%, 指生物质纤维与 PBAT 的复合材料中生物质纤维的质量分数为 30%或 60%) 的弯曲模量和弯曲强度见图 1。PBAT 是一种具有低强度和低模量的软质聚酯, 通过添加生物质纤维, PBAT 的弯曲模量和弯曲强度都得到了显著提升, 且生物质纤维的含量越多, 其弯曲模量提升效果越明显。当生物质纤维的质量分数达到 60% 时, PBAT/纸浆复合材料、PBAT/芦苇复合材料和 PBAT/黄麻复合材料的弯曲模量分别为 1 055、903、862 MPa, 较未改性 PBAT 的弯曲模量分别提高了约 12.0、10.3、9.8 倍。生物质纤维的加入对弯曲强度的影响情况如图 1b 所示, 当生物质纤维的质量分数为 30% 时, PBAT/生物质纤维复合材料的弯曲强度为 11~13 MPa, 较 PBAT 提高了约 2 倍, 随着生物质纤维含量的增加, 复合材料的弯曲强度只发生了微小变化。综上所述, 向 PBAT 中引入生物质纤维 (特别是纸浆) 可以提高复合材料的力学性能。

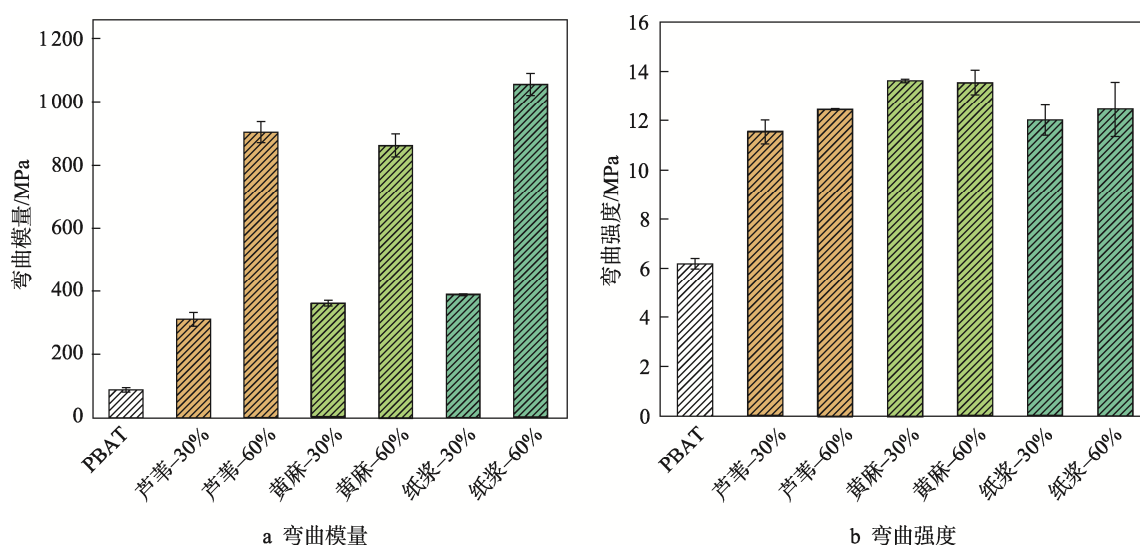


图 1 PBAT 及其与生物质纤维的复合材料的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of PBAT and its composites with biomass fibers

2.2 复合材料中生物质纤维的结构和形态

生物质纤维原料和从 PBAT/生物质纤维复合材料中提取出的生物质纤维的微观形貌如图 2 所示, 尺寸见表 1。材料经过加工后, 芦苇仍然保持着比粉末状填料(一般在几微米到几百微米之间)相对较大的尺寸, 平均长度为 2.05 mm, 黄麻和纸浆均保留了超过原料 50% 的长径比, 黄麻的长径比为 11.0, 纸浆的长径比为 35.5。

PBAT、生物质纤维及其复合材料的红外光谱见图 3。在 $2\,953\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,709\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带由 PBAT 上的 C—H 键和醛碳基的拉伸振动引起。添加生物质纤维后, 在复合材料的光谱中观察到 $2\,911$ 、 $2\,847$ 、 $2\,355\text{ cm}^{-1}$ 等 3 个吸收带, 这些是生物质纤维的特征峰, 无其他新的吸收带产生。这表明生物质纤维

与 PBAT 只是物理结合, 两者未发生化学反应。

通过观察 PBAT/生物质纤维复合材料的断面, 可以清晰地看出生物质纤维的形态。由图 4 可见, 生物质纤维的形状均为较长的棒状, 观察到芦苇和黄麻的直径较大, 纸浆的厚度较小。这些生物质纤维的内部具有源自天然植物纤维的微纤维结构, 同时生物质纤维均纵横交错地分布在 PBAT 中, 它们可在复合材料中起到类似骨架的作用, 生物质纤维越多, 骨架越坚固^[19], 因此材料的力学性能得到了显著提升。在含有质量分数为 60% 的生物质纤维的复合材料中, 生物质纤维周围无明显的孔洞和裂缝, 并且表面仍有树脂基体附着。也就是说, 即使复合材料中填充了高含量的生物质纤维, PBAT 与生物质纤维之间仍具有较好的相容性。

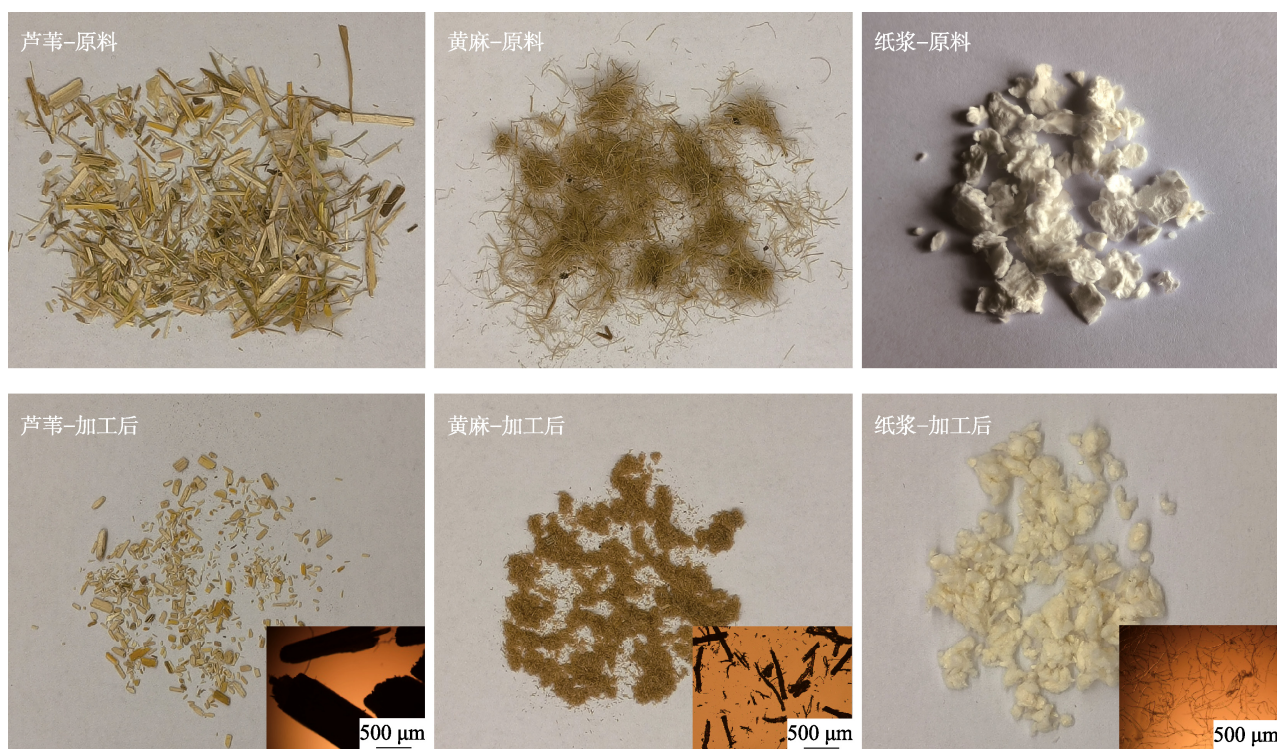


图 2 生物质纤维材料加工前后的形貌

Fig.2 Morphology of biomass fiber materials before and after processing

表 1 生物质纤维加工前后的尺寸

Tab.1 Size of biomass fibers before and after processing

样品	加工前			加工后		
	平均长度/ μm	平均直径/ μm	长径比	平均长度/ μm	平均直径/ μm	长径比
芦苇	6 300	770	8.2	2 050	660	3.1
黄麻	7 010	320	21.9	254	23	11.0
纸浆	920	17	54.1	533	15	35.5

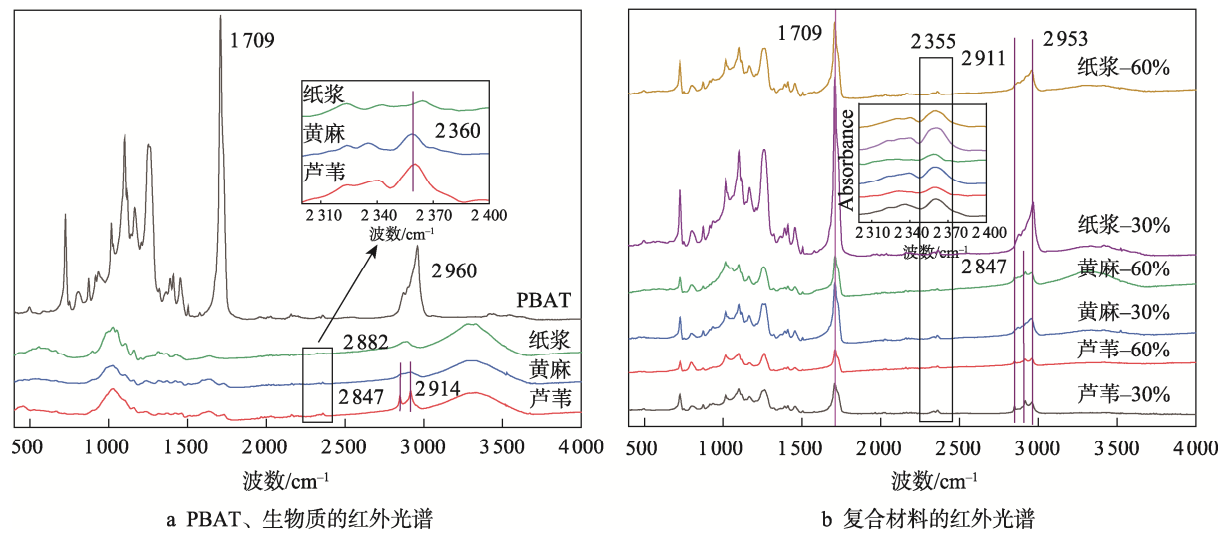


图 3 PBAT、生物质纤维及其与生物质纤维的复合材料的红外光谱
Fig.3 FT-IR spectra of PBAT, biomass fibers and their composites with biomass fibers

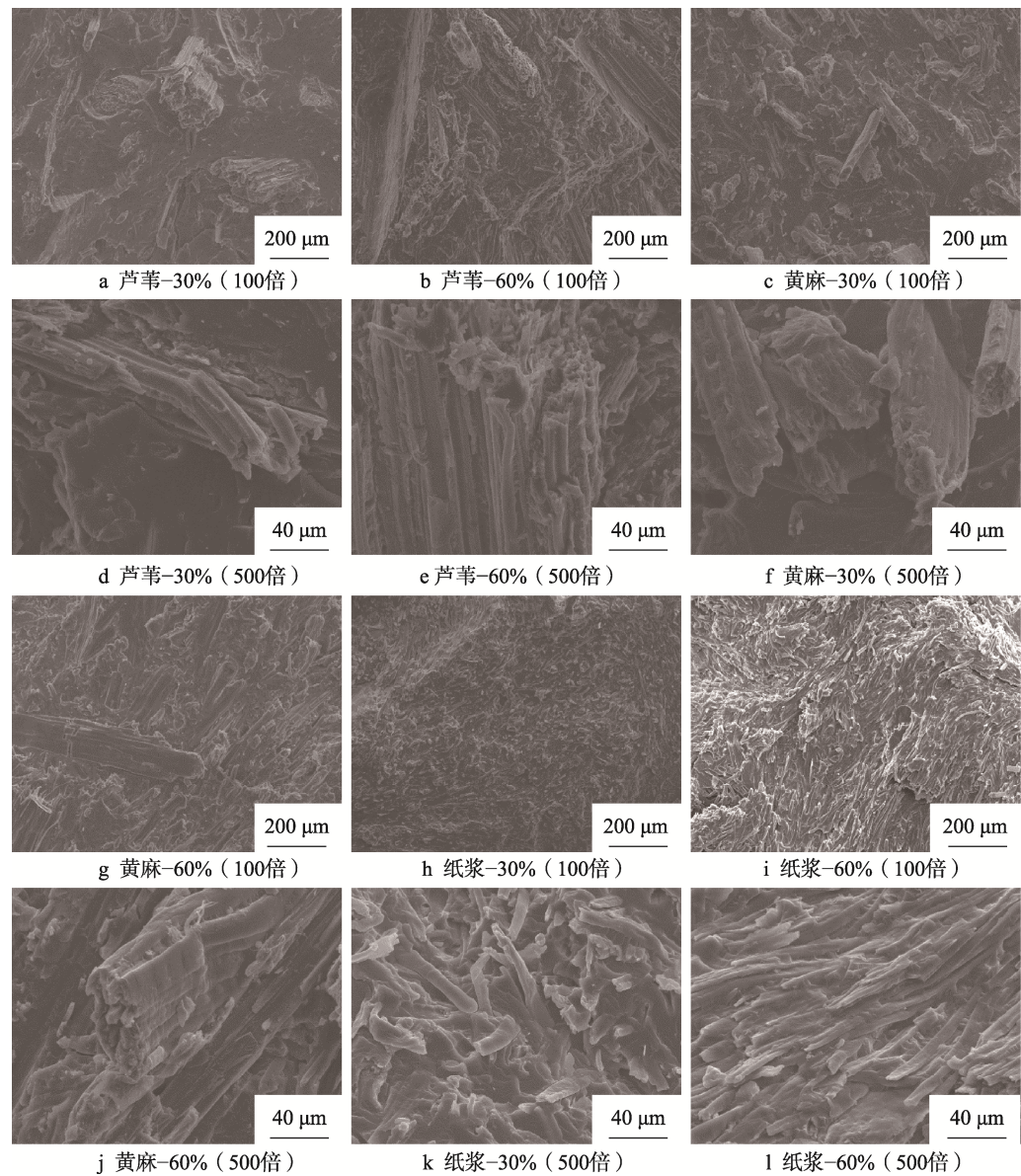


图 4 PBAT/生物质纤维复合材料在不同倍数下的断面扫描电镜图像
Fig.4 Cross-sectional SEM image of PBAT/biomass fibers composite at different magnification

2.3 热性能和结晶性能

PBAT 及其复合材料的 TGA 分析曲线如图 5 所示, 可以看到, PBAT 的初始分解温度为 379 °C, 加入生物质纤维后, 复合材料的初始分解温度均有所下降。这是由于生物质纤维的热稳定性比 PBAT 的热稳定性差, 在这些复合材料中, PBAT/纸浆复合材料在 330 °C (纸浆-30%) 和 312 °C (纸浆-60%) 时表现出最高的初始分解温度, 高于 PBAT/黄麻复合材料在 319 °C (黄麻-30%) 和 292 °C (黄麻-60%), 以及 PBAT/芦苇复合材料在 292 °C (芦苇-30%) 和 270 °C (芦苇-60%) 时的温度。在生物质纤维材料中, 纤维素具有相对最高的热分解温度 (超过 300 °C)。纸浆经植物纤维处理后, 其纤维素含量相对最高, 因此 PBAT/纸浆复合材料的初始分解温度相对最高。虽然加入生物质纤维后, 复合材料的热稳定性降低, 但是在填料的质量分数为 60% 时, 复合材料在 270 °C 以下未发生明显的热分解, 其热稳定性仍然比一般高分子聚合物 (例如聚氯乙烯等) 高^[20], 说明制备的复合材料能够满足较高的使用温度要求。

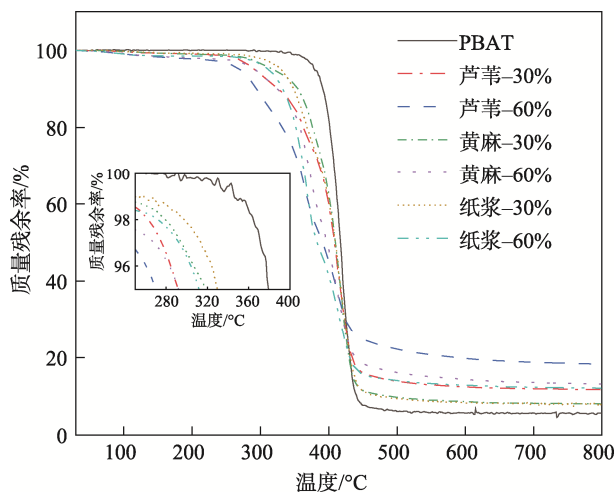
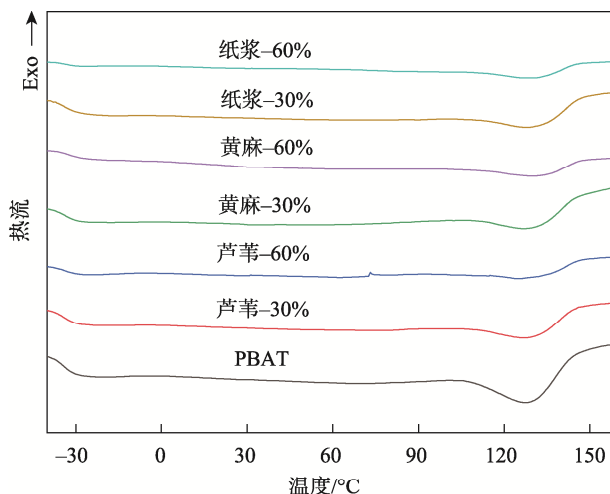


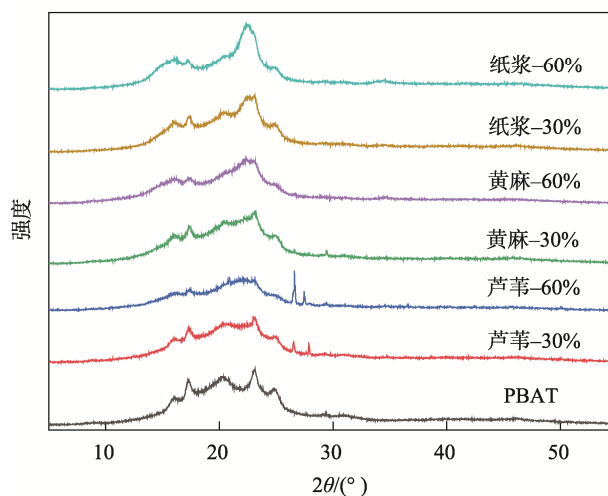
图5 PBAT 及其与生物质纤维的复合材料的 TGA 分析
Fig.5 TGA analysis of PBAT and its composites with biomass fibers

XRD 和 DSC 测试主要用来分析 PBAT 及其复合材料的结晶行为, 材料的 DSC 分析如图 6 和表 2 所示。生物质纤维的加入对 PBAT 的玻璃转化温度无明显的影响, 其熔融温度和冷结晶温度均略有提高, 结晶度均随着生物质纤维含量的增加而下降。PBAT 及其复合材料的 XRD 图如图 6b 所示。在 (011)、(010)、(110)、(100) 和 (111) 平面上出现了 PBAT 的 5 个特征衍射峰, 衍射角分别为 15.9°、17.3°、20.2°、23.1°、24.9°^[21]。在加入芦苇后, 衍射图谱在 26.7°有一个峰值, 这归因于纤维素的存在^[22]。随着生物质纤维含量的增加, 与 PBAT 原料相比, 复合材料的衍射峰未发生变化, 但衍射峰的强度下降。

此外, PBAT/芦苇复合材料中纤维素在 26.7°处的衍射峰越来越明显。根据上述分析, 生物质纤维的引入促进了 PBAT 的结晶, 但微晶的生长受到了不利因素的影响。同时, 生物质纤维的存在不能改变 PBAT 的晶型。



a 差示扫描量热法热谱图



b X射线衍射谱图

图6 PBAT 及其与生物质纤维的复合材料的结晶性能

Fig.6 Crystalline properties of PBAT and its composites with biomass fibers

2.4 吸水性和生物降解性

PBAT 及其与不同生物质纤维复合的材料吸水率变化情况如图 7 所示。从图 7 中可以看到, PBAT/生物质纤维复合材料的吸水率均显著高于 PBAT 的吸水率, 且生物质纤维的含量越高, 复合材料的吸水率越大。生物质纤维主要由纤维素、半纤维素、木质素组成, 它们富含大量的羟基, 这使得生物质纤维的加入让 PBAT/生物质纤维复合材料的吸水率得到较大提升。

表 2 PBAT 及其与生物质纤维的复合材料的热学性能
Tab.2 Thermal properties of PBAT and its composites with biomass fibers

样品	玻璃化转变 温度/℃	冷结晶 温度/℃	熔融 温度/℃	结晶焓	熔融焓	结晶度/%
PBAT	-29.39	96.97	129.00	13.67	7.76	6.8
芦苇-30%	-29.05	102.27	128.88	8.24	4.64	5.8
芦苇-60%	-28.43	107.95	135.69	5.03	1.69	3.7
黄麻-30%	-28.40	101.19	132.07	8.06	4.28	5.4
黄麻-60%	-28.05	103.65	136.78	4.90	2.43	5.3
纸浆-30%	-28.72	104.59	129.73	8.18	5.11	6.4
纸浆-60%	-28.71	100.45	133.34	6.04	2.08	4.7

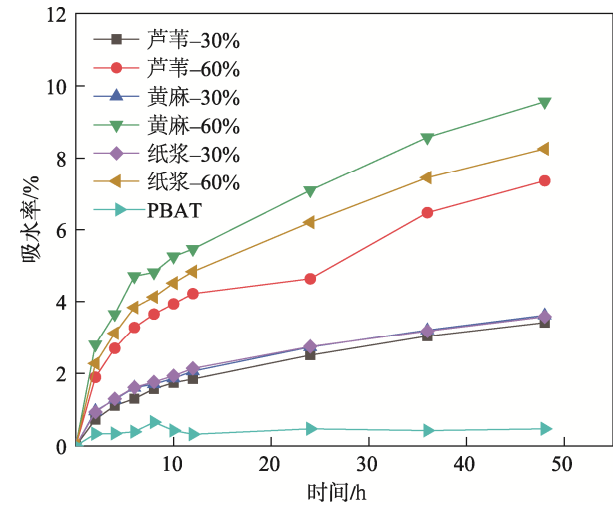


图 7 PBAT 及其与生物质纤维的复合材料的吸水率
Fig.7 Water absorption of PBAT and its composites with biomass fibers

通过对 PBAT 及其与芦苇、黄麻、纸浆的复合材料在土埋环境下的生物降解测试实验, 评估了 PBAT 及其复合材料的生物降解性。PBAT 及其复合材料在土埋条件下随时间的质量损失情况如图 8a 所示, 经过 150 d 的土埋降解处理后, PBAT 的质量损失率仅为 0.65%, 而 PBAT/芦苇复合材料的质量损失均较高, 表明生物质纤维在复合材料生物降解过程中起着重要作用, 促进了复合材料的降解。PBAT 的质量损失率不高, 这可能归因于 PBAT 结构中的芳香结构, PBAT 是脂肪族聚酯和芳香族聚酯的共聚物, 芳香族的存在极大地提高了聚合物的稳定性, 阻碍了 PBAT 的降解。复合材料的质量损失较高可能是因为液体介质从 PBAT 与生物质纤维材料的界面渗入, 复合材料的吸水性增加, 增大了复合材料与微生物的实际接触面积, 由此加速了复合材料的降解速度。同时, 对 PBAT 及其复合材料的质量损失进行了拟合, 以探寻其降解规律 (如图 8b 所示), 结果表明, PBAT 及其复合材料在土埋降解下的质量损失与降解时间线性拟合较好, 符合一级反应动力学。复合材料的速率常数 (拟合曲线的斜率) 均大于 PBAT 的。对于同一生

物质纤维, 填料的含量越高 (吸水性更强), 则其速率常数越大。在生物质纤维的含量相同时, 生物质纤维尺寸越大, 速率常数越大, 即复合材料的降解速率与吸水性和生物质填料的尺寸有关, 吸水性越强, 尺寸越大, 复合材料的降解速率越大。

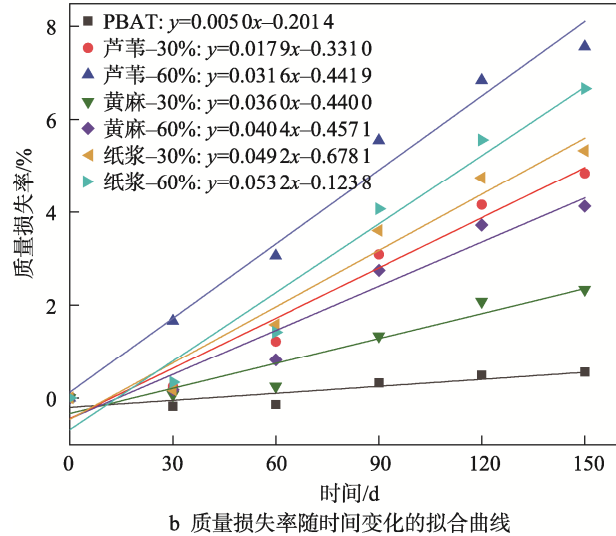
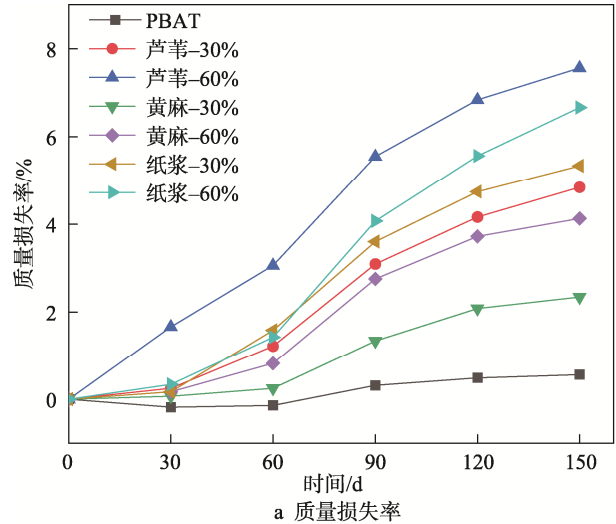


图 8 PBAT 及其与生物质纤维复合的材料的
质量损失情况
Fig.8 Mass loss of PBAT and its composites with biomass fibers

3 结语

文中制备了有望应用于包装材料的高填充硬质可降解 PBAT/生物质纤维复合材料,并研究了 3 种复合材料的结构性能和生物降解性。在复合材料中,芦苇具有较大的尺寸,黄麻和纸浆具有较大的长径比。生物质纤维的引入使得复合材料具有比 PBAT 更好的力学性能,并且 PBAT/纸浆表现出较佳的力学性能和热稳定性。通过简单地将质量分数为 60% 的纸浆与 PBAT 混合,材料的弯曲模量、弯曲强度可以分别达到 $(1\ 055\pm35)$ 、 (12.46 ± 1.10) MPa,同时加速了 PBAT 的结晶,促进了材料的硬化。降解试验结果表明,生物质纤维的引入增大了复合材料的吸水性,3 种复合材料的质量损失均大于 PBAT 的,通过质量损失与时间的线性拟合发现,复合材料的降解速率与吸水性和生物质填料的尺寸有关,吸水性越强,尺寸越大,则复合材料的降解速率越快。

参考文献:

- [1] 王雅彤, 范吕慧, 孙昊. 新型生物质代木包装材料的制备与特性[J]. 当代化工, 2021, 50(2): 308-311.
WANG Ya-tong, FAN Lyu-hui, SUN Hao. Preparation and Properties of Biomass Wood Substitute Packaging Material[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(2): 308-311.
- [2] THULASISINGH A, KUMAR K, YAMUNADEVI B, et al. Biodegradable Packaging Materials[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(7): 4467-4496.
- [3] ARIAS-ANDRES M, KLÜMPER U, ROJAS-JIMENEZ K, et al. Microplastic Pollution Increases Gene Exchange in Aquatic Ecosystems[J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 253-261.
- [4] SINGH JADAUN J, BANSAL S, SONTALIA A, et al. Biodegradation of Plastics for Sustainable Environment[J]. Bioresource Technology, 2022, 347: 126697.
- [5] JIAO Jian, ZENG Xiang-bin, HUANG Xian-bo. An Overview on Synthesis, Properties and Applications of Poly(Butylene-Adipate-co-Terephthalate)-PBAT[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, 3(1): 19-26.
- [6] FERREIRA F V, CIVIDANES L S, GOUVEIA R F, et al. An Overview on Properties and Applications of Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate)-PBAT Based Composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(S2): E7-E15.
- [7] 陈文君, 王蕾, 杨少华, 等. 以 PBAT 为基材的活性包装薄膜及其在食品包装中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 215-221.
CHEN Wen-jun, WANG Lei, YANG Shao-hua, et al. Research Progress on Active Packaging Film Based on PBAT and Its Application in Food Packaging[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(6): 215-221.
- [8] 云雪艳, 道日娜, 李晓芳, 等. PBAT/PCL 共混薄膜在草莓保鲜包装中的应用[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 92-97.
YUN Xue-yan, DAO Ri-na, LI Xiao-fang, et al. Application of Modified Poly(Butylene Adipate-co-Butylene Terephthalate)/Poly(Caprolactone) Blending Film in Fresh-Keeping Packaging of Strawberry[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 92-97.
- [9] ZHANG Ming-yue, BIESOLD G M, CHOI W, et al. Recent Advances in Polymers and Polymer Composites for Food Packaging[J]. Materials Today, 2022, 53: 134-161.
- [10] ZHANG Ping, LUO Shuang-ling, GAO De. Effects of Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate)/TiO₂ Nanocomposite Antimicrobial Films on Chilled Pork Quality[J]. Packaging Technology and Science, 2021, 34(11/12): 709-715.
- [11] NA Hai-ning, HUANG Jun-cheng, XU Hong-guang, et al. Structure and Properties of PLA Composite Enhanced with Biomass Fillers from Herbaceous Plants[J]. Journal of Renewable Materials, 2023(2): 491-503.
- [12] 梁志松, 何楠, 周旺, 等. 双碳目标下生物质能发展现状及应用路径研究[J]. 科技视界, 2022(18): 5-7.
LIANG Zhi-song, HE Nan, ZHOU Wang, et al. Research on the Development Status and Application Path of Biomass Energy with Double Carbon Targets[J]. Science & Technology Vision, 2022(18): 5-7.
- [13] SCAFFARO R, MAIO A, GAMMINO M, et al. Modeling the Structure-Property Relationships of High Performance PBAT-Based Biocomposites with Natural Fibers Obtained from *Chamaerops Humilis* Dwarf Palm[J]. Composites Science and Technology, 2022, 223: 109427.
- [14] XU Zhou, QIAOXiu-ying, SUN Kang. Environmental-Friendly Corn Stover/Poly (Butylene Adipate-co-Terephthalate) Biocomposites[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101541.
- [15] WU C S. Utilization of Peanut Husks as a Filler in Aliphatic-Aromatic Polyesters: Preparation, Characterization, and Biodegradability[J]. Polymer Degradation and

- Stability, 2012, 97(11): 2388-2395.
- [16] FERREIRA F V, PINHEIRO I F, MARIANO M, et al. Environmentally Friendly Polymer Composites Based on PBAT Reinforced with Natural Fibers from the Amazon Forest[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(8): 3351-3360.
- [17] PEREIRA DA SILVA J S, FARIAS DA SILVA J M, SOARES B G, et al. Fully Biodegradable Composites Based on Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate)/Peach Palm Trees Fiber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 129: 117-123.
- [18] MUTHURAJ R, MISRA M, MOHANTY A K. Biodegradable Biocomposites from Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) and Miscanthus: Preparation, Compatibilization, and Performance Evaluation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(43): 45448.
- [19] NA Hai-ning, HUANG Jun-cheng, XU Hong-guang, et al. Effect of High Content Filling Jute Fiber with Large Aspect Ratio on Structure and Properties of PLA Composite[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(3): 1429-1437.
- [20] LIU Jia, LV Yin, LUO Zhi-dong, et al. Molecular Chain Model Construction, Thermo-Stability, and Thermo-Oxidative Degradation Mechanism of Poly(Vinyl Chloride)[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(38): 31898-31905.
- [21] PAN Hong-wei, LI Zong-lin, YANG Jia, et al. The Effect of MDI on the Structure and Mechanical Properties of Poly(Lactic Acid) and Poly(Butylene Adipate-co-Butylene Terephthalate) Blends[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(9): 4610-4623.
- [22] HUANG Zhi-liang, YIN Qian-juan, WANG Qian-wen, et al. Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Three Kinds of Straws/Nylon 6 Composites[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 663-668.

责任编辑: 彭颀