

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.004

PBAT/PLA/纤维素复合材料的制备及性能

李诗¹, 聂陈郡², 李义安¹, 杜亮^{1,3}, 陈福涛⁴(1. 安徽工程大学化学与环境工程学院, 安徽芜湖 241000; 2. 安徽大学材料科学与工程学院, 合肥 230601;
3. 安徽大学化学化工学院, 合肥 230601; 4. 安徽福美达新材料科技有限公司, 安徽宣城 242000)

摘要: 为开发高性能生物可降解材料, 以聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)、聚乳酸(PLA)和纤维素为原材料, 采用熔融共混法制备 PBAT/PLA/纤维素复合材料。系统研究了 PBAT 与 PLA 质量比、挤出机转速以及挤出机温度对复合材料微观形貌、拉伸性能、抗冲击性能及热变形温度的影响规律。实验结果表明, 当 PBAT 与 PLA 质量比为 80/16, 挤出机转速为 40 r/min, 挤出机各区温度为 165/170/185/185/175/175/175 °C 时, 复合材料混合均匀且无明显分层, 冲击强度为 23.96 kJ/m², 断裂伸长率为 9.7%, 表现出优异的韧性。此外, 热变形温度呈现出对工艺参数的规律性依赖: 热变形温度随挤出机转速增大而升高, 随挤出温度升高而降低, 60 r/min 转速时的变形量相较于转速为 20 r/min 时降低了 35%, 热变形温度增加 9%。在挤出机温度最低时, 其热变形温度最大且变形量最小, 形变量仅为 0.21 mm, 此时, 复合材料的耐热性能最佳。研究通过优化组分配比与加工工艺, 显著改善了 PBAT/PLA/纤维素复合材料的力学与热学性能, 为生物基复合材料的设计和加工提供了新的思路。

关键词: 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯; 聚乳酸; 热学性能; 力学性能; 生物可降解

中图分类号: TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0026-07

Preparation and properties of PBAT/PLA/cellulose composite materials

LI Shi¹, NIE Chenjun², LI Yian¹, DU Liang^{1,3}, CHEN Futao⁴

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000; 2. School of Materials Science and Engineering, Anhui University, Hefei 230601; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei 230601; 4. Anhui Fumeida New Material Technology Co., Ltd., Xuancheng 242000)

Abstract : To develop high-performance biodegradable materials, PBAT/PLA/cellulose composites were prepared by melt blending using polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT), polylactic acid (PLA) and cellulose as raw materials. The influence laws of the mass ratio of PBAT to PLA, the speed of the extruder and the temperature of the extruder on the microstructure, tensile properties, impact resistance and heat distortion temperature of the composite materials were systematically studied. Experimental results indicate that when the PBAT/PLA ratio is 80:16, the extruder rotational speed is 40 r/min, and the temperatures in each zone of the extruder are 165, 170, 85, 185, 175, 175, and 175 °C, the composite materials are evenly mixed without obvious separation, and its impact strength is 23.96 kJ/m² and an elongation at break is 9.7%, exhibiting excellent impact resistance and material toughness. In addition, it shows a regular dependence of the heat distortion temperature on the process parameters, the heat distortion temperature increases with the increase of the extruder speed and decreases with the increase of the extrusion temperature. The deformation amount at a speed of 60 r/min is 35% lower than that at a speed of 20 r/min, and the heat distortion temperature increases by 9%. When the temperature of the extruder is at its lowest, the heat distortion temperature of the composite material is the largest and the deformation is the smallest, with a deformation of only 0.21 mm, indicating that the heat resistance of the composite material is the best. Through optimizing the blend ratio and processing the mechanical and thermal properties of PBAT/PLA/cellulose compos-

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(2024AH050112), 绿色化工技术福建省高校重点实验室开放课题基金项目(WYKF-GCT2024-3), 安徽工程大学科研启动基金项目(2022YQQ087, S022022164)

通信作者: 李诗, 理学博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为生物质功能薄膜、锂电池隔膜、分子动力学模拟

收稿日期: 2025-09-15

引用格式: 李诗, 聂陈郡, 李义安, 等. PBAT/PLA/纤维素复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11):26-32.

LI Shi, NIE Chenjun, LI Yian, et al. Preparation and properties of PBAT/PLA/cellulose composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11):26-32.

ites have been significantly improved, offering novel insights for the design and processing of bio-based composites.

Keywords : polybutylene adipate-co-terephthalate ; polylactic acid ; thermal performance ; mechanical property ; biodegradable

随着全球白色污染问题日益严峻以及“双碳”战略的推进,传统石油基塑料(如聚乙烯、聚丙烯)难以降解,生物基高分子材料因其可再生和可降解的特性成为理想的替代品^[1]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)是一种典型的可降解热塑性生物基高分子材料,具有良好的柔韧性、延展性和耐热性,是目前非常活跃的生物基材料之一^[2-3]。然而,PBAT树脂因其在加工过程中具有易黏结、力学性能差、成本高等缺点,限制了其在材料领域的应用^[4]。聚乳酸(PLA)具有优异的机械强度与刚性,还具备易加工、成本低等优点,与PBAT熔融共混,可以得到高强度、高韧性的可降解复合材料^[5-6]。而纤维素作为自然界最丰富的天然高分子材料,可作为增强填料改善复合材料的综合性能^[7]。因此,研究PBAT/PLA/纤维素三元复合材料的制备及性能,对开发高性能生物基复合材料具有重要意义。

生物基复合材料,在包装、医疗、农业等领域,引发了广泛关注^[8-9],杨冰等^[10]通过共混法制备了PLA/PBAT复合材料,结果显示,随着PLA含量不断增加,复合材料的拉伸强度呈现出先降低后升高的非单调变化态势,当PLA质量分数提高到90%时,拉伸强度达到峰值60.12 MPa。同样地,Sritham等^[11]研究了PLA纤维增强PBAT复合材料在室温和-18℃下的力学性能,当PLA质量分数为40%时,PLA/PBAT共混物的拉伸弹性模量有所提高,并出现了相分离现象。此外,竹纤维的引入可促进复合材料的快速降解^[12]。纤维素纳米晶可在PLA中形成强网络,提高复合材料的拉伸弹性模量^[13]。Mhd Ramle等^[14]在PLA和PBAT复合体系中引入微晶纤维素,有效增强复合材料的抗油、抗酸性能。

然而,生物基复合材料的制备也面临着诸多的挑战,例如,填料的种类、挤出机温度和螺杆转速对样品性能的影响。笔者通过熔融共混法制备PBAT/PLA/纤维素生物基复合材料,对其热性能、力学性能、表面形貌进行表征,系统研究挤出工艺参数对性能的影响,优化条件提升生物基复合材料韧性和热性能,推动生物降解材料应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

纤维素粉:粒径90 μm,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

PLA:FY601,密度1.24 g/m³,熔点175℃,中国石油化工股份有限公司;

PBAT:FH-80,熔点130℃,中国石油化工股份有限公司;

马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH):接枝率8%,平均分子量3 000~8 000 g/mol,山东首诚化工有限公司;

硬脂酸:纯度≥95%,山东中旺油脂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

真空干燥箱:DZF-6020,上海一恒科学仪器有限公司;

电子天平:HZK-FA110,华志(福建)电子科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-60A,岛津企业管理(中国)有限公司;

电子万能材料试验机:AI-7000-MU1,高铁检测仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:DSC-60A,日本岛津仪器有限公司;

维卡软化/热变形温度试验机:HV-3000-P3,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4800,日本电子株式会社;

转矩流变仪:RM200C,哈尔滨哈普电气技术有限公司;

摆锤抗冲击试验机:高铁检测仪器(东莞)有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 PBAT/PLA/纤维素复合材料的制备

样品制备流程如图1所示。首先将纤维素、PLA、PBAT置于真空干燥箱中80℃干燥8 h。然后打开转矩流变仪和电脑,点击桌面上的哈普流变仪控制软件,选择“挤出平台”,进入软件后,点击链接实验所用设备,然后设置好各区温度及转速。将PBAT、PLA、纤维素、PE-g-MAH和硬脂酸按照表1

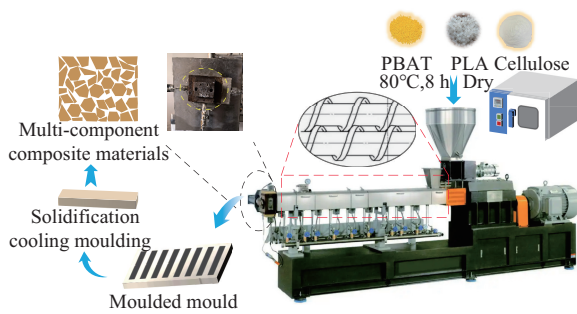


图1 生物基PBAT/PLA/纤维素复合材料制备流程图

Fig. 1 Preparation procedure of bio-based PBAT/PLA/cellulose composites

表1 PBAT/PLA/纤维素复合材料的配方(质量分数)

Tab. 1 Composition of PBAT/PLA/cellulose composites (mass fraction)

Samples	PBAT	PLA	Cellulose	PE-g-MAH	Stearic acid	%
1 [#]	88	8	1	2	1	
2 [#]	86	10	1	2	1	
3 [#]	84	12	1	2	1	
4 [#]	82	14	1	2	1	
5 [#]	80	16	1	2	1	

所示的比例合计称取200 g,充分搅拌混合后放入烧杯备用。将仪器预热30 min,待其各区域温度达到设置温度后,将烧杯中的粒料加入料斗中进行“清洗”机器,洗料完成后另外称取200 g粒料搅拌均匀后加入料斗当中,在双螺杆挤出机中熔融共混。

挤出后滴入8 cm×1 cm×0.4 cm的样品槽中,待冷却后,进行后处理,得到PBAT/PLA/纤维素复合样条;其中,挤出机转速为40 r/min,挤出温区设定为165/170/185/185/175/175/175 °C。

1.3.2 挤出机转速不同的样品的制备

按5[#]样品的比例配备原料,将挤出机的转速从20 r/min递增到60 r/min,每次增大10 r/min,其中挤出温区设定为165/170/185/185/175/175/175 °C,制备出样条,各样品制备时挤出机具体转速见表2。

表2 样品制备时挤出机转速

Tab. 2 Extruder speed during samples preparation

Item	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
Rotational speed/(r·min ⁻¹)	20	30	40	50	60

1.3.3 挤出机温度不同的样品的制备

以5[#]样品的比例混合原料,改变挤出机温度,以三、四两区为标准,其余各区温度保持温差随之增加,将三、四两区的温度从170 °C逐渐升高到190 °C,转速为40 r/min,制备出样条。各样品具体分区温度见表3。

表3 样品制备时挤出机分区温度

Tab. 3 Temperature of extruder zone during samples preparation

Samples	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	°C
11 [#]	150	155	170	170	160	160	
12 [#]	155	160	175	175	165	165	
13 [#]	160	165	180	180	170	170	
14 [#]	165	170	185	185	175	175	
15 [#]	170	175	190	190	180	180	

1.4 性能测试与结构表征

1.4.1 DSC 测试

首先,将条状样品放入粉碎机中打碎;称取4~5 mg的粉末样品,压制样品,将样品与参比物放入加热腔中,样品在外,参比物在内。在氮气氛围中,先以20 °C/min的速率升温至200 °C,恒温3 min,再以20 °C/min的速率降温至20 °C,恒温3 min,最后,以10 °C/min的速率升温至200 °C。结晶度计算见式(1)。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{W \cdot \Delta H_{m0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c 为聚合物的结晶度,单位%; ΔH_m 为聚合物的实际熔融焓,单位J/g; ΔH_{m0} 为聚合物100%结晶的理论熔融焓(PLA和PBAT的 ΔH_{m0} 分别为93 J/g和114 J/g); W 为聚合物的质量分数,单位%。

1.4.2 冲击强度测试

(1)用游标卡尺测量试样的宽度和厚度,测量多次取平均值;

(2)调节简支梁,使能量盘指针归零;

(3)将摆锤抬起并锁住,把试样置于样品台,确保平稳且中心缺口与摆锤冲击点对齐;

(4)释放摆锤,使其自由下落冲击试样,从表盘上读取试样的最终角度。

缺口试样冲击强度的计算见式(2)。

$$\alpha_k = \frac{10^3 A_k}{d_k b} \quad (2)$$

式中: A_k 为试样吸收的冲击能,单位J; d_k 为缺口处试样的厚度,单位mm; b 为试样的宽度,单位mm。

1.4.3 拉伸性能

将样品固定在拉伸试验机的上下机头中间。测试时,样品沿轴向被施加拉力,直至试样断裂。通过电子万能材料试验机得到样品的拉伸强度、断裂伸长率、拉伸弹性模量等信息。

1.4.4 热变形温度测试

使用维卡软化/热变形温度试验机按照 GB/T 1634.1-2025 (HDT-ISO) 进行测试,跨距为 64 mm,负载为 0.45 MPa,升温速率为 120 °C/h。

1.4.5 SEM 测试

样品为非导电材料,在进行测试前,需进行喷镀导电层(镀金)处理,样品厚度控制在 20 nm 左右。

2 结果与讨论

2.1 PBAT/PLA 比例对热性能的影响

DSC 是在一定温度范围调控下,衡量两种及上物质的功率差与温度关系曲线的一种热分析技术^[15]。纯 PBAT、纯 PLA 及复合材料的 DSC 曲线见图 2。从图中可以看出,五种复合材料的熔融温度均在 170 °C 左右,纯 PLA 的熔融吸热峰在 173 °C 附近,纯 PBAT 的熔融吸热峰在 134 °C 附近,表明 PBAT/PLA/纤维素复合材料的熔融温度主要由 PLA 决定,改变 PBAT/PLA 的混合比例对其熔融温度无明显影响。通过式(1)可计算得出 PBAT 和 PLA 在共混物中的结晶度,见表 4。纯 PBAT 的结晶度为 14.93%,加入 PLA 后,其结晶度升高,在 PLA 质量分数为 12% 时, PBAT 的结晶度最大。由此可见,复合材料的结晶随着 PLA 含量的增加而受到抑制,分子链难以实现进一步的有序排列^[16]。

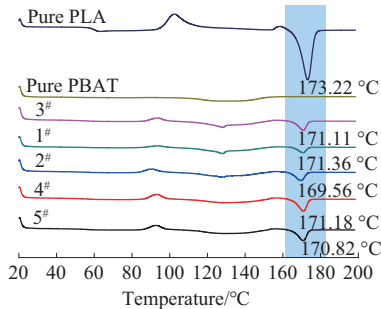


图2 PLA、PBAT 及 PBAT/PLA/纤维素复合材料的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of PLA, PBAT and PBAT/PLA/cellulose composites

表 4 PBAT/PLA/纤维素复合材料中 PBAT 的结晶度

Tab. 4 Crystallinity of PBAT in PBAT/PLA/cellulose composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
Crystallinity of PBAT	17.62	17.58	18.65	17.34	16.04

2.2 PBAT/PLA 比例对力学性能的影响

2.2.1 冲击性能

为了研究 PBAT/PLA 比例对冲击性能的影响,本实验对 1[#]至 5[#]样分别进行了冲击性能测试,每个样品测三次,取平均值。由图 3 可知,随着 PLA 含量的增加,复合材料的冲击强度先增强后稳定,当

PLA 质量分数达到 16% 时,冲击强度增强显著,PLA 质量分数再继续增加时,复合材料脆性增加,样条无法成型,因此,选用 PLA 质量分数为 16% 的配方进行后续实验。

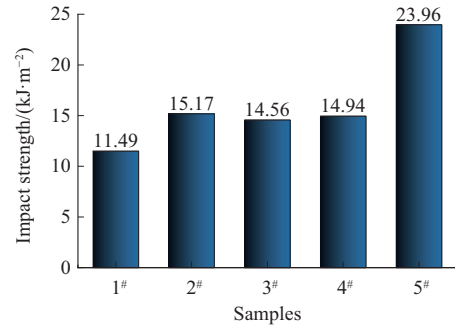


图3 PBAT/PLA/纤维素复合材料的冲击强度

Fig. 3 Impact strength of PBAT/PLA/cellulose composites

2.2.2 拉伸性能

通过拉伸试验机对 1[#]至 5[#]样品做拉伸测试,从给出的图 4 中能够清晰地看出,应变最大时的 PBAT/PLA 比例为 86/10,当 PLA 含量适中时,其拉伸强度为最小。通过对比五种不同比例的复合材料的应力-应变曲线,可以看出五种复合材料的曲线在前半段时均呈现出逐步上升的趋势,随后出现了平滑阶段,最后在某点处垂直下降。这说明复合材料在受到外力拉伸时都能具有一定抵抗外力破坏的能力,随着拉力的增加,其会进入到了一个相对较为稳定的状态。而断裂点则明确地标志着所能承受的最大拉伸强度。其中 PLA 质量分数为 10% 的复合材料拉伸强度最大,达到 2.81 MPa,表明其刚性最好,不易断裂;PLA 质量分数为 12% 的复合材料断裂伸长率最大,表明其韧性较好。当 PBAT 与 PLA 质量比为 80/16 时,断裂伸长率为 9.7%。由图 5 可以看出,PLA 的含量对复合材料的拉伸弹性模量影响不大,五种复合材料的拉伸弹性模量相差不大^[17]。

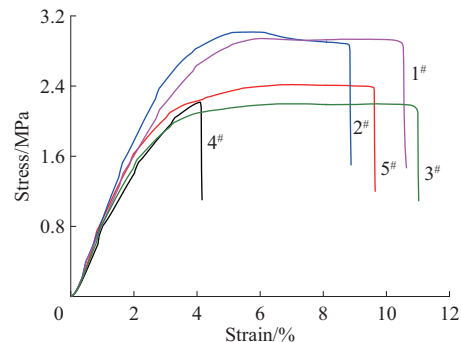


图4 PBAT/PLA/纤维素复合材料的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of PBAT/PLA/cellulose composites

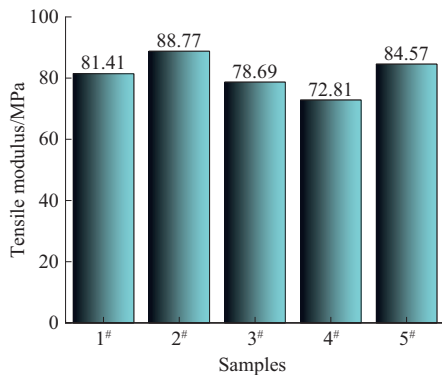


图5 PBAT/PLA/纤维素复合材料的拉伸模量

Fig. 5 Tensile modulus of PBAT/PLA/cellulose composites

2.3 PBAT/PLA 比例对耐热性能的影响

图6为PBAT/PLA/纤维素复合材料热变形温度及变形量对比图,热变形温度能反映材料的刚性和耐热性能。由图6可知,随着PLA的含量增加,复合材料的热变形温度整体呈上升趋势,从42.6 °C升高到46.4 °C,但其变形量呈下降趋势,从0.23 mm下降到0.20 mm。PLA的脂肪族聚酯链段排列规整,属于刚性脂肪族聚合物,从而其玻璃化转变温度高,大约为60 °C,而PBAT为芳香族化合物,其玻璃化转变温度约为零下30 °C,当PLA的含量越高时,复合材料的玻璃转变温度越高,需要更高的能量才能引发链段运动,故其热变形温度随PLA含量的增加而逐渐升高,表明其耐热性能越好。

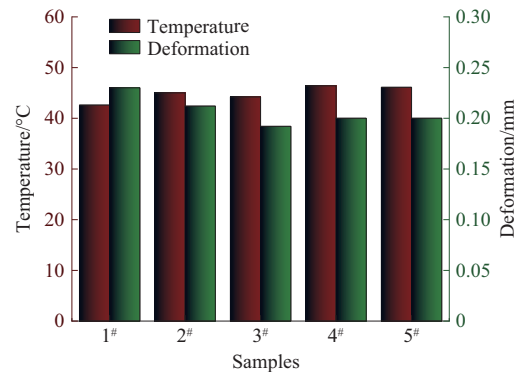


图6 PBAT/PLA/纤维素复合材料热变形温度及变形量

Fig. 6 Heat deflection temperature and deformation of

PBAT/PLA/cellulose composites

2.4 PBAT/PLA/纤维素复合材料的SEM图

图7为样品表面SEM照片。由图7可以观察到材料的表面结构,图7b为纯PBAT的电镜图,纯PBAT表面有明显的空隙结构,但空隙分布均匀,样品表面较为平整,无明显缺陷;图7c为纯PLA的电镜图,纯PLA的表面相对光滑,但有特定的纹理和缺陷;图7a为5#样品的电镜图,从图中可以看出,样品在制备时,熔融共混物是层层叠加的,但两种物质混合较均匀,无明显分层现象,样品表面较为粗糙,由于PLA的引入,混合物表面无空隙,表明,PBAT和PLA共混后,可以互补并改进对方的缺点,进而可以提高复合材料的相关性能。

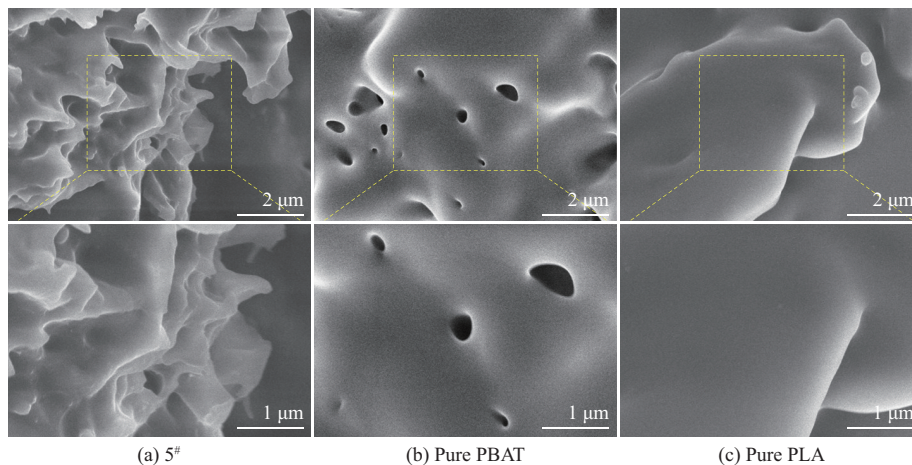


图7 样品表面SEM照片

Fig. 7 SEM photos of samples

2.5 挤出机转速对复合材料冲击性能的影响

图8为不同转速下制备样品的冲击强度图,由图8可以分析出,随着挤出机转速的增加,PBAT/PLA/纤维素复合材料的冲击强度先增大再减小,转速为40 r/min时,冲击强度最大,为23.96 kJ/m²。当

转速过慢时,两种原料在挤出机中的混合速度较慢,容易使机头发生堵塞,制备出的样品中PBAT和PLA分散较不均匀,故导致复合材料的冲击强度较低。而当转速较大时,两种原料还未完全熔融共混,就被挤出,导致原料在样品中分散不均匀,导致

冲击强度降低。转速为40 r/min时制备出的样品质量最佳且形貌最好,因此在生产时,应当采用40 r/min的转速。

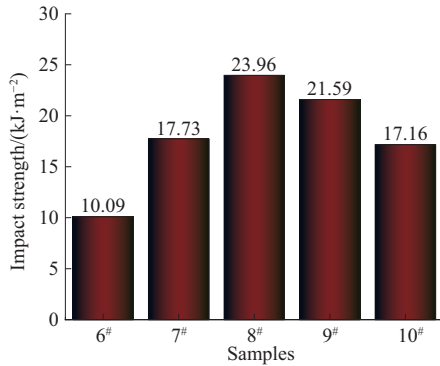


图8 不同转速下制备复合材料的冲击强度

Fig. 8 Impact strength of composites prepared at different rotational speeds

2.6 挤出机转速对复合材料耐热性能的影响

图9为不同转速下制备的复合材料的热变形温度及变形量。由图9可以看出,复合材料的热变形温度随转速的增加而不断升高,变形量不断降低,在转速60 r/min时,复合材料的耐热性最优。当转速过小时,PBAT、PLA和纤维素等原料在挤出机中混合不均匀,导致挤出的物料中PBAT和PLA分散不均,进而导致材料的耐热性能较差。其中,60 r/min转速时的变形量相较于转速为20 r/min时降低了35%,热变形温度增加9%。在现实应用时,可以通过提高挤出机转速来提高生物基材料的耐热性能,以满足需求。

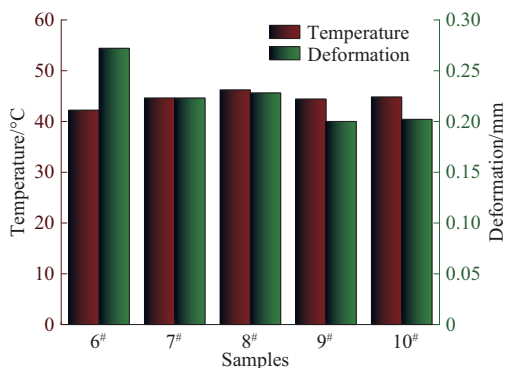


图9 不同转速下制备的复合材料的热变形温度及变形量

Fig. 9 Heat deflection temperature and deformation of composites prepared at different rotational speeds

2.7 挤出机温度对复合材料冲击性能的影响

为了探究挤出机温度对复合材料的冲击性能影响,改变温度制备出11#至15#样品,并对它们的冲击性能进行测试,见图10所示。由图10可分析出,复合材料的冲击强度随挤出机温度的升高先增加

再减小,样品14#在各区温度为165/170/185/185/175/175 °C时,其冲击强度最大,为23.96 kJ/m²,冲击性能最好。当挤出机三区四区温度高于PLA的熔融温度170 °C时,有利于PLA/PBAT/纤维素三者的熔融共混,从而得到的复合材料更加均匀,致使材料的冲击性能更优。

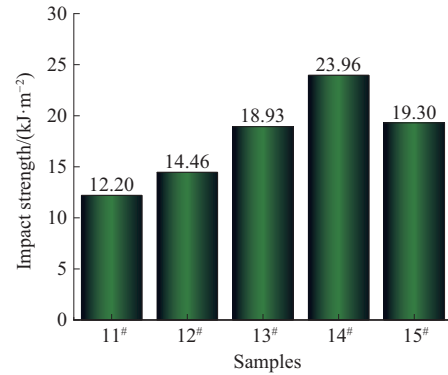


图10 不同温度下制备的复合材料的冲击强度

Fig. 10 Impact strength of composites prepared at different temperatures

2.8 挤出机温度对复合材料耐热性能的影响

图11为不同温度下制备的复合材料的热变形温度及变形量。由图11可以看出,复合材料的热变形温度随挤出机的温度升高逐渐降低,而其变形量呈现整体趋势随温度的升高而变大;在挤出机温度最低时,其热变形温度最大且变形量最小,形变量仅为0.21 mm。此时,复合材料的耐热性能最佳;而当温度过高时,复合材料的热变形温度最小,并且变形量也较大。此时,可能由于温度过高,导致PLA、PBAT内部发生化学变化从而导致耐热性能下降。因此,在工业生产中,如果需要制备耐热性能较好的复合材料时,低温制备可能会是适宜的选择。

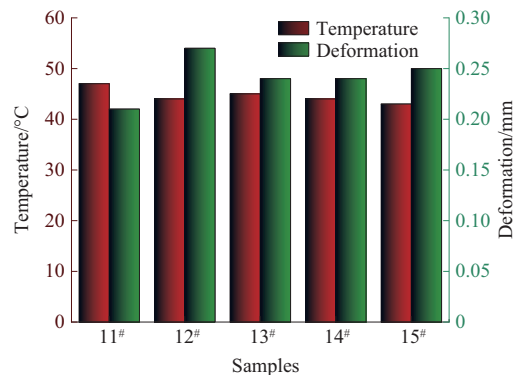


图11 不同温度下制备的复合材料的热变形温度及变形量

Fig. 11 Heat deflection temperature and deformation of composites prepared at different temperatures

3 结论

制备了一系列PBAT/PLA/纤维素复合材料,研究了不同PBAT/PLA比例下的复合材料的热性能、力学性能以及耐热性能,不同挤出机转速和温度对复合材料的力学性能的影响。通过实验发现,不同比例的PBAT/PLA复合材料的熔融温度变化不大,主要由PLA决定;复合材料的热变形温度和冲击强度均随着PLA含量的增加而增大。当PLA质量分数为10%时,复合材料的拉伸强度最大,达到2.81 MPa。当转速为40 r/min,各区温度为165/170/185/185/175/175/175 °C时,复合材料的冲击强度最大,为23.96 kJ/m²;而当挤出温度较低,转速较高时,所得生物基PBAT/PLA/纤维素复合材料耐热性能最佳。这些分析结果为相关领域的研究和应用提供了许多有价值的参考和启示,有助于推动生物基复合材料行业的不断发展和完善。

参考文献

- 刘玉飞,杨昌磊,魏寒娜.传统塑料的“新替身”—生物基高分子材料[J].知识就是力量,2024,(4):26–27.
LIU Yufei, YANG Changlei, WEI Hanna. The "new body double" of traditional plastics-bio-based polymer materials[J], Knowledge is Power, 2024, (04):26–27.
- 王如平,王彦明,王泽虎,等.生物可降解高分子材料应用研究进展[J].山东化工,2022,51(5):98–99,103.
WANG Ruping, WANG Yanming, WANG Zehu, et al. Recent application advances of biodegradable polymeric materials[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(5):98–99, 103.
- 杨尚山,尚鹏鹏,徐静,等.可生物降解PBAT/PLA/生物质垃圾袋的制备和表征[J].中国塑料,2022,36(11):127–132.
YANG Shangshan, SHANG Pengpeng, XU Jing, et al. Preparation and characterizations of biodegradable PBAT/PLA/biomass garbage bags[J]. China Plastics, 2022, 36(11):127–132.
- 王治洲,李晓芳,宋树鑫,等.PCL对PBAT薄膜气体透过率的影响[J].塑料科技,2017,45(11):56–61.
WANG Zhizhou, LI Xiaofang, SONG Shuxin, et al. Effect of polycaprolactone on gas permeability of poly(butylene terephthalate) film[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(11):56–61.
- 陈荣源,张福鹏,郭欢,等.可降解材料增韧聚乳酸的研究进展[J].塑料科技,2025,53(1):167–172.
CHEN Rongyuan, ZHANG Fupeng, GUO Huan, et al. Research progress of polylactic acid toughened by degradable materials[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(1):167–172.
- 张敏,孟庆阳,刁晓倩,等.PLA/PBAT共混物的降解性能研究[J].中国塑料,2016,30(8):79–86.
ZHANG Min, MENG Qingyang, DIAO Xiaoqian, et al. Biodegradation behavior of PLA/PBAT blends[J]. China Plastics, 2016, 30(8):79–86.
- 康佳豪,李骥昂,孙鹏,等.小麦秸秆纤维素改性PLA/PBAT薄膜制备及性能研究[J].当代化工研究,2024(6):180–184.
KANG Jiahao, LI Ji'ang, SUN Peng, et al. Research on the preparation and properties of wheat straw cellulose-modified PLA/PBAT films[J]. Modern Chemical Research, 2024(6):180–184.
- 李梦雅,雷文,陈泳.植物纤维/PBAT/PLA三元复合材料的制备及性能进展[J].塑料,2025,54(2):101–105,116.
LI Mengya, LEI Wen, CHEN Yong. Preparation and performances of plant fiber/PBAT/PLA ternary composite[J]. Plastics, 2025, 54(2):101–105, 116.
- LA FUENTE C I A, MANIGLIA B C, TADINI C C. Biodegradable polymers: A review about biodegradation and its implications and applications[J]. Packaging Technology and Science, 2023, 36(2): 81–95.
- 杨冰,张自强,张以河,等.PBAT/PLA薄膜的制备及性能研究[J].中国塑料,2015,29(3):45–50.
YANG Bing, ZHANG Ziqiang, ZHANG Yihe, et al. Preparation and properties of PBAT/PLA film[J]. China Plastics, 2015, 29(3): 45–50.
- SRITHAM E, PHUNSOMBAT P, CHAISHOME J. Tensile properties of PLA/PBAT blends and PLA fibre-reinforced PBAT composite[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 192. DOI: 10.1051/mateconf/201819203014.
- MHD RAMLE S F, AHMAD N A, MOHAMMAD RAWI N F, et al. Physical properties and soil degradation of PLA/PBAT blends film reinforced with bamboo cellulose[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 596(1). DOI: 10.1088/1755-1315/596/1/012021.
- SARUL D S, ARSLAN D, VATANSEVER E, et al. Preparation and characterization of PLA/PBAT/CNC blend nanocomposites [J]. Colloid and Polymer Science, 2021, 299(6):987–998.
- MHD RAMLE S F, RAHIM A A, JUSOH N H, et al. Analysis on the barrier properties of thin film PLA/PBAT reinforced with microcrystalline cellulose[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2129(1). DOI:10.1088/1742-6596/2129/1/012059.
- 易小红,邹同华.差示扫描量热法在食品热物性测量中的应用[J].计量与测试技术,2006,33(9):22–23.
YI Xiaohong, ZOU Tonghua. The application of DSC in the measurement of foods' thermal properties[J]. Metrology & Measurement Technique, 2006, 33(9):22–23.
- 邱嘉濠,王春花,易勇,等.生物基PA510/D10的制备及性能[J].工程塑料应用,2025,53(7):9–15.
QIU Jiahao, WANG Chunhua, YI Yong, et al. Preparation and performance of biobased PA510/D10[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7):9–15.
- FENG J N, ZHANG W X, WANG L, et al. Performance comparison of four kinds of straw/PLA/PBAT wood plastic composites[J]. BioResources, 2020, 15(2):2 596–2 604.