

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.025

不同粒径碳酸钙对 PBAT 复合薄膜性能的影响

庞会霞¹,李娟¹,周万维²,刘云虎²,胡智¹,高成涛¹

(1. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014; 2. 贵州省产品质量检验检测院, 贵阳 550014)

摘要: 用硬脂酸对三种不同粒径的碳酸钙 (CaCO_3) 进行表面改性, 并通过傅里叶变换红外光谱分析证实了硬脂酸已成功包覆在 CaCO_3 表面上。采用熔融共混吹膜法制备聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (PBAT)/改性 CaCO_3 复合薄膜, 研究不同粒径的改性 CaCO_3 对复合薄膜熔融结晶行为、力学性能和水蒸气透过性能的影响。结果表明, 加入改性 CaCO_3 后, PBAT 的结晶温度、结晶度及熔融温度都有所提高, 当加入体积平均粒径为 $7.6\ \mu\text{m}$ 的改性活性 CaCO_3 时, 结晶温度和结晶度均达到最大值。加入改性 CaCO_3 后, PBAT/改性 CaCO_3 复合薄膜的力学性能均有明显的提高, 且随着改性 CaCO_3 粒径减小, 力学性能逐渐升高。当添加体积平均粒径为 $0.34\ \mu\text{m}$ 的改性纳米 CaCO_3 时, 复合薄膜的拉伸强度达到了最大值 $19.9\ \text{MPa}$, 比纯 PBAT 增加了 $10.07\ \text{MPa}$, 断裂标称应变达到了 551.8% , 较纯 PBAT 提高了 54% , 直角撕裂强度由纯 PBAT 的 $72.5\ \text{kN/m}$ 提升到了 $139.3\ \text{kN/m}$ 。添加改性 CaCO_3 后薄膜对水蒸气的阻隔性能增强, 加入改性活性 CaCO_3 的复合薄膜的水蒸气透过率最低, 为 $232.3\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\ \text{h})$, 比纯 PBAT 薄膜降低了 28.06% , 相应的水蒸气渗透系数降低了 66.09% 。

关键词: 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯; 碳酸钙; 粒径; 复合薄膜; 力学性能; 水蒸气透过性能

中图分类号: TQ317.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0148-06

Effects of Calcium Carbonate with Different Particle Sizes on Properties of PBAT Composite Films

Pang Huixia¹, Li Juan¹, Zhou Wanwei², Liu Yunhu², Hu Zhi¹, Gao Chengtao¹

(1. Guizhou Material Industrial Technology Institute, Guiyang 550014, China; 2. Guizhou Provincial Product Quality Inspection and Testing Institute, Guiyang 550014, China)

Abstract: The surface of three kinds of calcium carbonate (CaCO_3) with different particle sizes were modified with stearic acid, and Fourier transform infrared spectrum analysis confirms that stearic acid is successfully coated on the surface of CaCO_3 . The poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/modified CaCO_3 composite film was prepared by melt-extrusion blown film method, and the effects of modified CaCO_3 with different particle sizes on the melting crystallization behaviors, mechanical properties and water vapor permeability of the composite films were studied. The results show that after adding modified CaCO_3 , the crystallization temperature, crystallinity and melting temperature are all increased. When modified activated CaCO_3 with $7.6\ \mu\text{m}$ of volume average particle size is added, the crystallization temperature and crystallinity both reach the maximum. After adding modified CaCO_3 with different particle sizes, the mechanical properties of the PBAT/modified CaCO_3 composite films are significantly improved, with the reduction of the modified CaCO_3 particle size, the mechanical properties increase gradually. When modified nano- CaCO_3 with $0.34\ \mu\text{m}$ of volume average particle size is added, the tensile strength of the composite film reaches the maximum value of $19.9\ \text{MPa}$, which is $10.07\ \text{MPa}$ higher than that of pure PBAT, the nominal tensile strain at break reaches 551.8% , which is 54% higher than that of pure PBAT, the right angle tearing strength is increased from $72.5\ \text{kN/m}$ of pure PBAT to $139.3\ \text{kN/m}$. When the modified CaCO_3 is added, the composite film has stronger water vapor barrier performance than pure PBAT film. The water vapor transmission rate of composite film with modified activated CaCO_3 is the lowest, which is $232.3\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\ \text{h})$ and is 28.06% lower than that of pure PBAT film, the corresponding water vapor permeability is reduced by 66.09% .

Keywords: poly(butylene adipate-co-terephthalate); calcium carbonate; particle size; composite film; mechanical property; water vapor permeability

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52063007), 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2020MK095), 贵州省高层次创新型人才项目 (黔科和平台人才 [2019]5630), 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2019]2029, [2020]4Y223, [2021]9), 贵阳市白云区科技计划项目 (白科合同 [2020]26 号)

通信作者: 周万维, 硕士, 主要从事塑料包装领域研究

收稿日期: 2022-02-10

引用格式: 庞会霞, 李娟, 周万维, 等. 不同粒径碳酸钙对 PBAT 复合薄膜性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):148-153.

Pang Huixia, Li Juan, Zhou Wanwei, et al. Effects of calcium carbonate with different particle sizes on properties of PBAT composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):148-153.

聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)是己二酸丁二醇酯和对苯二甲酸丁二醇酯的共聚物,既具有较好的韧性和稳定性,又具有优良的生物降解性,是理想的绿色环保薄膜包装材料^[1-2],也是目前研究较多的一种可生物降解塑料之一。但是 PBAT 自身的拉伸强度较低、降解速率缓慢,而且价格是普通聚丙烯的 5~6 倍,因此在应用推广方面受到了一定的限制^[3-5]。目前研究的重点是如何能够得到性能优越而且成本低廉的可生物降解材料,大部分研究都是通过使用价格较为廉价的填料与 PBAT 共混,以制备绿色复合材料,在确保其可降解性能的同时控制成本,扩大其在市场上的应用价值^[6]。

随着“限塑令”的推行,可生物降解塑料产业引起了越来越多的关注。PBAT 的填充复合材料也成为了研究的热点,国内外相关报道也较多。相关报道主要分为两种:一种是将 PBAT 与其它可生物降解聚合物共混得到复合材料,目前研究较多的其它可生物降解聚合物是聚乳酸(PLA)和聚丁二酸丁二酯(PBS)^[7-8]等,但由于共混材料自身价格也比较高,因此此类复合材料的制备成本较高,难以被广泛推广应用;另一种通过添加价格低廉的无机粉体来改善基体的力学性能,如蒙脱土、碳酸钙(CaCO_3)、淀粉等^[9-11]。由于 CaCO_3 价格较低,而且对聚合物有一定的增韧作用,是目前用途最广的聚合物填料之一^[12-14]。

采用 CaCO_3 作为填充粉体制备 PBAT/ CaCO_3 复合材料,成为降低 PBAT 使用成本的一条可行途径,相关报道也较多。马祥艳等^[15]研究了 PLA/PBAT/纳米 CaCO_3 三元复合材料的性能,加入纳米 CaCO_3 后,复合材料的热学性能及物理性能都有很大的改善。杨冰等^[16]使用 CaCO_3 对 PBAT 进行填充,制备可降解复合材料并对其力学性能和微观结构进行表征,发现 CaCO_3 在改善复合材料力学性能的同时大幅度降低了成本。肖运鹤等^[17]用超细 CaCO_3 改性 PBAT,并探讨了超细 CaCO_3 对材料结构与性能的影响。结果表明,材料的力学性能都有较大的提高,当加入 20% 的 CaCO_3 时,复合材料依然具有比较好的物理性能。但是大多数研究都是选择一种粒径的 CaCO_3 作为填充材料,而关于 CaCO_3 粒径大小对 PBAT 性能的研究较少,笔者通过对三种不同粒径的 CaCO_3 进行表面改性,进一步用熔融共混的方法制备 PBAT/改性 CaCO_3 复合薄膜,并研究了不同粒径的 CaCO_3 对 PBAT 熔融结晶行为、力学性

能及水蒸气透过性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBAT: 1908, 密度 $1.26 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$, 熔融温度 $115 \sim 125^\circ\text{C}$, 山西金晖兆隆高新科技股份有限公司;

活性 CaCO_3 : PCC-P, 桂林金山新材料有限公司;

超细活性 CaCO_3 (简称超细 CaCO_3): JD-4, 桂林金山新材料有限公司;

纳米活性 CaCO_3 (简称纳米 CaCO_3): JS-960, 桂林金山新材料有限公司;

硬脂酸: 分析纯, 天津天大化学试剂厂。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机: SHR-5A 型, 张家港云帆机械有限公司;

双螺杆挤出机: TSE40A 型, 南京瑞亚高聚物制品有限公司;

吹膜机: SCM-20 型, 武汉瑞鸣实验仪器制造有限公司;

激光粒度分布仪: Bettersize2600 型, 丹东百特仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC25 型, 美国 TA 公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet Is50 型, 美国赛默飞世尔科技公司;

微机控制电子万能试验机: CMT6104 型, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

水蒸气透过率测试系统: C360M 型, 济南兰光机电技术有限公司。

1.3 CaCO_3 的表面改性

将三种 CaCO_3 粉体在 80°C 下干燥 24 h, 随后将它们与 1.5 份硬脂酸在高速混合机中混合, 升温至 45°C , 低速启动, 在 1400 r/min 下混合 5 min, 然后增加到 2800 r/min , 高速持续搅拌 15 min, 最后, 将腔室冷却到 30°C , 得到经过表面改性的 CaCO_3 , 最后将其在室温下干燥储存。

1.4 PBAT/改性 CaCO_3 复合薄膜制备

分别将质量分数为 30% 的改性 CaCO_3 与 PBAT 均匀混合, 在双螺杆挤出机中挤出造粒, 螺杆转速为 200 r/min , 挤出机温度设置范围 $130 \sim 170^\circ\text{C}$, 机头温度 160°C 。将挤出造粒的 PBAT 粒料在空气中敞开干燥 48 h, 在吹膜机上吹膜, 吹膜机的温度范围为 $150 \sim 180^\circ\text{C}$, 主机螺杆转速为 $100 \sim$

300 r/min。

1.5 性能测试与结构表征

(1) 熔融与结晶行为分析

采用 DSC 仪,在氮气气氛下,将制好的试样快速升温至 200℃,并恒温 3 min 以消除热历史,之后以 10℃/min 的速率降温至 20℃,然后,以 10℃/min 的速率升温至 200℃。对试样的结晶与熔融行为进行表征分析,由式 (1) 得出试样结晶度:

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

式中: X_c ——结晶度, %;

ΔH_m ——PBAT 复合材料熔融时的热焓, J/g;

ΔH_m^0 ——PBAT 完全熔融时的热焓,其值为 114 J/g^[18];

w ——PBAT/CaCO₃ 复合材料中 PBAT 的质量分数, %。

(2) FTIR 分析

通过 FTIR 仪对改性前后的 CaCO₃ 及 PBAT/改性 CaCO₃ 复合薄膜进行分析,扫描范围 500 ~ 4000 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,扫描次数 32。

(3) 力学性能测试

根据 GB/T 1040.3-2006 测试薄膜拉伸性能,标距为 50 mm,拉伸速度为 500 mm/min;根据 QB/T 1130-1991 测试薄膜直角撕裂性能。

(4) 水蒸气透过性能测试

根据 GB/T 1037-1988 测试薄膜的水蒸气透过性能。选取表面平整、厚度均匀且无破损的薄膜样品,将其裁成 3 个直径为 74 mm 的圆片,然后固定在透湿杯中,测试相对湿度为 90%,测试温度为 38℃,称重间隔为 4 h,利用水蒸气透过率测试系统测定薄膜样品的水蒸气透过率 (WVTR) 和水蒸气渗透系数 (WVP),取平均值。

2 结果与讨论

2.1 CaCO₃ 粒径分析

在对 CaCO₃ 进行改性之前,先采用激光粒度分布仪对三种 CaCO₃ 的粒径进行了测试,图 1 为三种改性前 CaCO₃ 的粒径分布曲线。

由图 1 可知,活性 CaCO₃ 的粒径分布范围比较广,主要分布于 1 ~ 20 μm,体积平均粒径为 7.6 μm;超细 CaCO₃ 的粒径主要分布于 0.2 ~ 5 μm,体积平均粒径为 1.5 μm;纳米 CaCO₃ 的粒径分布比较集中,主要分布于 0.2 ~ 0.5 μm,体积平均粒径为 0.34 μm。

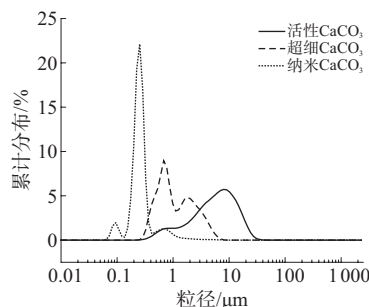


图 1 CaCO₃ 粒径分布

2.2 结构分析

对改性前后的 CaCO₃ 进行 FTIR 分析,结果如图 2 所示。由图 2 可看出,未改性的 CaCO₃ 在 3500, 1800, 1445, 871, 711 cm⁻¹ 处出现了 CaCO₃ 的特征峰,其中 1445, 871, 711 cm⁻¹ 处为 CO₃²⁻ 的特征峰,3500 cm⁻¹ 处为 CaCO₃ 表面—OH 的伸缩振动吸收峰,改性后—OH 的伸缩振动吸收峰强度均有明显加强和偏移。而改性 CaCO₃ 在 2923 cm⁻¹ 和 2852 cm⁻¹ 处出现了新的吸收峰,分别为硬脂酸烷基链中—CH₃ 和—CH₂ 的伸缩振动吸收峰,说明硬脂酸已经成功包覆在 CaCO₃ 表面。

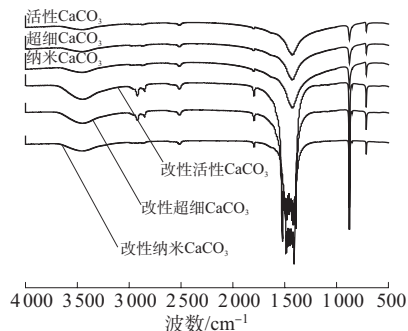


图 2 改性前后 CaCO₃ 的 FTIR 谱图

对纯 PBAT 及 PBAT/改性 CaCO₃ 复合薄膜进行 FTIR 分析,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,纯 PBAT 在 2954 cm⁻¹ 处出现—CH 伸缩振动吸收峰,在 1709 cm⁻¹ 和 1268 cm⁻¹ 处产生 C=O 和 C—O—C 的强吸收峰,在 1459 cm⁻¹ 处出现了苯环

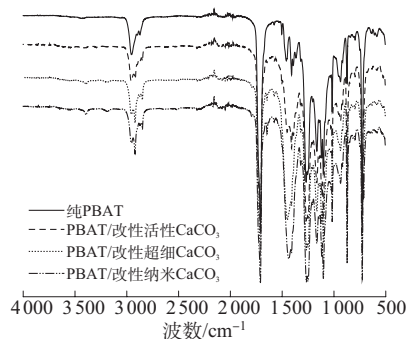
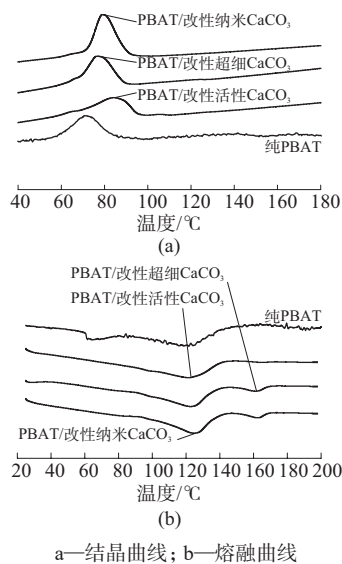


图 3 纯 PBAT 和 PBAT/改性 CaCO₃ 复合薄膜的 FTIR 谱图

骨架结构的振动吸收峰,在 726 cm^{-1} 和 1165 cm^{-1} 处出现不同—CH 取代的弯曲振动峰^[9]。与纯 PBAT 相比, PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜中,在 2920 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 附近处出现了新的吸收峰,为硬脂酸烷基链中— CH_3 和— CH_2 的伸缩振动吸收峰,在 3394 cm^{-1} 处有较弱的—OH 吸收峰,在 712 cm^{-1} 处出现微弱的 CO_3^{2-} 的特征峰,说明改性后的 CaCO_3 分散于 PBAT 基体中。

2.3 熔融与结晶行为分析

图 4 为纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的结晶曲线和熔融曲线,表 1 为纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的熔融与结晶参数。由图 4a 和表 1 可以看出,加入改性 CaCO_3 后,结晶温度向高温方向移动,结晶温度与 CaCO_3 粒径大小无直接对应关系。当加入改性活性 CaCO_3 时结晶温度达到最大值,为 84.12°C ,较纯 PBAT 提高 13.07°C 。改性 CaCO_3 的加入,使 PBAT 复合薄膜的结晶温度提高,可能是因为 CaCO_3 的加入在 PBAT 基体中起异相成核的作用,以 CaCO_3 为成核点,使得复合材料在更高的温度下开始结晶。由图 4b 和表 1 可以看出,加入改性 CaCO_3 后,复合薄膜的熔融温度比纯 PBAT 稍微有所提升, CaCO_3 的粒径越



a—结晶曲线; b—熔融曲线

图 4 纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的结晶曲线和熔融曲线

表 1 纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的熔融与结晶参数

薄膜样品	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
纯 PBAT	71.05	121.62	8.01	10.04
PBAT/ 改性活性 CaCO_3	84.12	121.69	9.16	11.48
PBAT/ 改性超细 CaCO_3	76.48	122.91	8.81	11.04
PBAT/ 改性纳米 CaCO_3	79.98	124.99	8.15	10.21

注: T_c 为结晶温度, T_m 为熔融温度, ΔH_m 为熔融热焓, X_c 为结晶度。

细, PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的熔融温度值越高, 加入改性纳米 CaCO_3 的最高, 为 124.99°C 。另外, 由图 4b 还可看出, 在添加改性超细和纳米 CaCO_3 后, 两种复合薄膜分别在 161.80°C 和 163.36°C 时出现小的熔融峰, 这可能是加入这两种改性 CaCO_3 后, 其在 PBAT 基体中形成了异相成核, 进而诱导 PBAT 形成另一种晶型。

由表 1 可知, 加入不同粒径改性 CaCO_3 后, 复合薄膜的结晶度都有所提高。当加入改性活性 CaCO_3 时结晶度达到最大值, 由纯 PBAT 的 10.4% 提高到 11.48%, 这主要是因为加入改性 CaCO_3 形成异相晶核, 成核点较多, 促进 PBAT 分子链快速形成球晶结构, 从而在一定程度上提高结晶度。但改性 CaCO_3 的粒径越小, 结晶度提高的幅度也越小, 可能的原因是 CaCO_3 颗粒越细, 越容易团聚, 在 PBAT 基体中形成的异相成核点减少, 从而使得结晶能力变差。

2.4 力学性能分析

表 2 为纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的力学性能。由表 2 可知, 与纯 PBAT 相比, PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜力学性能均有明显的提高, 且随着改性 CaCO_3 粒径减小, 复合薄膜力学性能逐渐升高。当添加改性纳米 CaCO_3 时, 复合材料的拉伸强度达到了最大值 19.9 MPa , 比纯 PBAT 增加了 10.07 MPa , 断裂标称应变从 357.4% 提高到了 551.8%, 较纯 PBAT 提高了 54%, 直角撕裂强度由纯 PBAT 的 72.5 kN/m 提升到了 139.3 kN/m 。这可能是因为 CaCO_3 粒径越小, 比表面积越大, 粒子与 PBAT 发生物理结合的机会越多, 从而使得复合薄膜的强度和韧性都增强。

表 2 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的力学性能

薄膜样品	拉伸强度 / MPa	断裂标称 应变 /%	直角撕裂 负荷 /N	直角撕裂强度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
纯 PBAT	9.83	357.4	2.9	72.5
PBAT/ 改性活性 CaCO_3	14.1	434.1	4.3	86.6
PBAT/ 改性超细 CaCO_3	18.5	524.2	5.6	134.2
PBAT/ 改性纳米 CaCO_3	19.9	551.8	5.9	139.3

2.5 水蒸气透过性能分析

表 3 为纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的水蒸气透过性能。由表 3 可以看出, 纯 PBAT 的 WVTR 为 $322.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})$, WVP 为 $3.45 \times 10^{-13}\text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。综合来看, 添加改性 CaCO_3 后复合薄膜的 WVTR 和 WVP 值比纯

PBAT 薄膜的更低,且 WVTR 值最低的是加入改性活性 CaCO_3 的复合薄膜,为 $232.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$,比纯 PBAT 薄膜降低了 28.06%,相应的 WVP 值降低了 66.09%。主要是因为硬脂酸在实验温度下不溶于水,只有在高温加热条件下才会表现出亲水性,加入硬脂酸改性后的 CaCO_3 会增强薄膜的阻隔性能。

表 3 纯 PBAT 及 PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜的水蒸气透过性能

薄膜样品	WVTR/ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})^{-1}$]	WVP/ [$\text{g} \cdot \text{cm} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$]
纯 PBAT	322.9	3.45×10^{-13}
PBAT/ 改性活性 CaCO_3	232.3	1.17×10^{-13}
PBAT/ 改性超细 CaCO_3	260.4	1.54×10^{-13}
PBAT/ 改性纳米 CaCO_3	275.7	1.45×10^{-13}

3 结论

(1) 通过 FTIR 分析,证实了硬脂酸已经成功包覆在 CaCO_3 表面,改性后的 CaCO_3 已分散于 PBAT 基体中。

(2) 加入改性 CaCO_3 后, PBAT 的结晶温度、结晶度及熔融温度都有所提高。当加入改性活性 CaCO_3 时结晶温度达到最大值,为 84.12°C ,较纯 PBAT 提高 13.07°C ; 结晶度也在加入改性活性 CaCO_3 时达到最大值,由纯 PBAT 的 10.4% 提高到 11.48%。当加入改性纳米 CaCO_3 时,熔融温度达到最大值,为 124.99°C 。

(3) PBAT/ 改性 CaCO_3 复合薄膜力学性能均有明显的提高,且随着改性 CaCO_3 粒径减小,力学性能逐渐升高。当添加改性纳米 CaCO_3 时,复合薄膜的拉伸强度达到了最大值 19.9 MPa,比纯 PBAT 增加了 10.07 MPa,断裂标称应变从 357.4% 达到了 551.8%,较纯 PBAT 提高了 54%,直角撕裂强度由纯 PBAT 的 72.5 kN/m 提升到了 139.3 kN/m。

(4) 添加改性 CaCO_3 后复合薄膜对水蒸气的阻隔性能增强, WVTR 值最低的是加入改性活性 CaCO_3 的复合薄膜,为 $232.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$,比纯 PBAT 薄膜降低了 28.06%,相应的 WVP 值降低了 66.09%。

参考文献

- [1] Pivsa-Art W, Pavasupree S, O-Charoen N, et al. Preparation of polymer blends between poly (L-lactic acid), poly (butylene succinate-co-adipate) and poly (butylene adipate-co-terephthalate) for blow film industrial application[J]. Energy Procedia, 2011, 9:581-588.
- [2] Signori F, Coltelli M B, Bronco S. Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(but ylenes adipate-co-terephthalate)(PBAT) and their blends upon melt processing[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(1):74-82.
- [3] 李旭娟,钟淦基,冉蓉,等. PBAT/TPS 共混物的结构,性能和断裂行为[J]. 中国塑料, 2014, 28(2):25-30.
Li Xujuan, Zhong Ganji, Ran Rong, et al. Structure, properties and fracture behavior of biodegradable PBAT/TPS blends[J]. China Plastics, 2014, 28(2):25-30.
- [4] 张云飞. 硅灰石填充 PLA/PBAT 共混体系的结构与性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
Zhang Yunfei. Study on structure and performance of wollastonite filled PLA/PBAT blend system[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Techonlogy, 2020.
- [5] Ding Y, Lu B, Wang P L, et al. PLA-PBAT-PLA tri-block copolymers:Effective compatibilizers for promotion of the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 147:41-48.
- [6] Fourati Y, Tarrés Q, Mutjé P, et al. PBAT/thermoplastic starch blends:Effect of compatibilizers on the rheological, mechanical and morphological properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 199:51-57.
- [7] 王鑫,石敏,余晓磊,等. 聚己二酸对苯二甲酸丁二酯(PBAT) 共混改性聚乳酸(PLA) 高性能全生物降解复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(11):1 897-1 909.
Wang Xin, Shi Min, Yu Xiaolei, et al. High Performance and fully biodegradable poly (lactic acid) (PLA) composites modified by poly (butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT):A review[J]. Materials Review, 2019, 33(11):1 897-1 909.
- [8] Costa A R D M, Crocitti A, Carvalho L H D, et al. Properties of biodegradable films based on poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends[J]. Polymers, 2020, 12(10). DOI:10.3390/polym12102317.
- [9] 张贺,陈芳萍,刘昌胜. PBAT-g-MA 对热塑性淀粉/聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯共混合金性能的影响[J]. 塑料工业, 2016, 44(8):14-17, 22.
Zhang He, Chen Fangping, Liu Changsheng. Effect of PBAT-g-MA on properties of thermoplastic starch/PBAT blends[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(8):14-17, 22.
- [10] 黄伟江,吕广福,韦龙杰,等. PBAT/ 微晶纤维素复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(9):12-16.
Huang Weijiang, Lyu Guangfu, Wei Longjie, et al. Study on preparation and properties of PBAT/microcrystalline cellulose composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(9):12-16.
- [11] 杨菁卉,杨福馨,李绍菁,等. PBAT/ 淀粉填充可降解薄膜的制备及降解性能的研究[J]. 功能材料, 2020, 51(9):10 075-10 080.
Yang Jinghui, Yang Fuxin, Li Shaojing, et al. Preparation and degradability of PBAT/starch filled degradable films[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(9):10 075-10 080.
- [12] 李红媛. 纤维素增强 PPC/ CaCO_3 复合材料及其降解性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

- Li Hongyuan. Study on fabrication and properties of biodegradable PPC/CaCO₃ composites reinforced by cellulose[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2013.
- [13] Liang J Z, Zhou L, Tang C Y, et al. Crystalline properties of poly(L-lactic acid) composites filled with nanometer calcium carbonate[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 45(1):1 646–1 650.
- [14] 杨柳,张雅琪,赵亚浩,等. 双增 PLA/PBAT/TiO₂ 复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(2):67–71.
- Yang Liu, Zhang Yaqi, Zhao Yahao, et al. Preparations and properties of double-strength PLA/PBAT/TiO₂ composite[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(2):67–71.
- [15] 马祥艳,王翔宇,李莉,等. PLA/PBAT/ 纳米碳酸钙三元复合材料的微观形貌与性能[J]. 塑料, 2017, 46(5):93–97.
- Ma Xiangyan, Wang Xiangyu, Li Li, et al. Morphologies and properties of PLA /PBAT/nano-CaCO₃ ternary composite[J]. Plastics, 2017, 46(5):93–97.
- [16] 杨冰,季君晖,许颖,等. 碳酸钙高填充聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯可降解复合材料的制备及性能表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(4):139–142.
- Yang Bing, Ji Junhui, Xu Ying, et al. Application of CaCO₃ high loaded poly butylene adipate-co-terephthalate (PBAT)[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(4):139–142.
- [17] 肖运鹤,宁平,薛继荣,等. 超细碳酸钙填充可降解聚酯材料的研究[J]. 塑料, 2009, 38(3):69–71.
- Xiao Yunhe, Ning Ping, Xue Jirong, et al. Degradable polyester filled with ultrafine CaCO₃[J]. Plastics, 2009, 38(3):69–71.
- [18] Ntarelli C, Lopes C, Carneiro J, et al. Zinc slow-release systems for maize using biodegradable PBAT nanofibers obtained by solution blow spinning[J]. Journal of Materials Science, 2021. DOI:10.1007/s10853-020-05545-y.
- [19] 钟生缘,杨序平. 改性木质素/PBAT 复合材料的制备及其性能[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(2):8–13.
- Zhong Shengyuan, Yang Xuping. Study on properties of PBAT composite filled with modified lignin[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2019, 34(2):8–13.
-
- (上接第 142 页)
- Deng Zhaoming, Zhang Ying. Mechanical design fundamentals[M]. Beijing:Higher Education Press, 2000.
- [10] 郑正,雷君相,罗宇舟. 基于 ANSYS 对塑料齿轮的结构静力学分析[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5):163–166.
- Zheng Zheng, Lei Junxiang, Luo Yuzhou. Static analysis of plastic gear structure based on ANSYS[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(5):163–166.
- [11] 李韬. 汽车座椅调角器基本性能要求及检测方法[J]. 客车技术与研究, 1999, 21(4):43–45.
- Li Tao. Basic performance requirements and testing methods of auto seat back rest adjuster[J]. Bus & Coach Technology and Research, 1999, 21(4):43–45.
- [12] 侯瑞. 变速箱差壳胀套设计及有限元分析[J]. 金属功能材料, 2021, 28(2):78–82.
- Hou Rui. Design and finite element analysis of differential case expansion sleeve of gearbox[J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(2):78–82.
- [13] 刘长剑. 攀钢 2050 立辊轧机主传动减速器的设计与优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- Liu Changjian. Design and optimization of the main reducer of the edging mill of 2050 Pangang[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2018.
- [14] 胡仁喜,徐东升,李亚东. ANSYS13.0 机械与结构有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2011:106–108.
- Hu Renxi, Xu Dongsheng, Li Yadong. ANSYS13.0 mechanical and structural finite element analysis from entry to the master[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2011:106–108.
- [15] 罗成,阙洪军,汤云,等. 大型垂直升船机减速器结构设计及受力分析[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(6):91–95, 100.
- Luo Cheng, Que Hongjun, Tang Yun, et al. Structural design and feasibility analysis of reducer for large vertical ship lift[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(6):91–95, 100.
- [16] 衡艺欣,赵晶,王世杰. 大型 500 kV 变压器主密封法兰系统受力分析[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10):99–104.
- Heng Yixin, Zhao Jing, Wang Shijie. Stress analysis of main sealing flange system of large 500 kV transformer[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(10):99–104.