

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.006

EVAC-g-MAH增容和乙酰柠檬酸三丁酯增塑PLA/PBAT共混体系

王小君, 曾安然, 张青海, 汪扬涛, 陈婷

(黎明职业大学新材料与鞋服工程学院, 福建泉州 362000)

摘要: 聚乳酸(PLA)与聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)共混是改善PLA脆性和加工性的有效途径,但二者相容性差导致力学性能不足。以乙烯-乙酸乙烯共聚物接枝马来酸酐(EVAC-g-MAH)为相容剂,乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC)作为增塑剂,通过熔融挤出制备PLA/PBAT/EVAC-g-MAH/ATBC共混体系,考察了EVAC-g-MAH和ATBC的用量对共混体系的力学性能、流动性能、热稳定性、结晶性能、流变性能和形貌结构的影响,为高性能可降解材料开发提供理论依据。实验结果表明,随着EVAC-g-MAH含量的增加,共混物的界面相容性增加,EVAC-g-MAH的MAH基团与PLA/PBAT的极性基团反应,有利于PLA/PBAT共混体系热稳定、结晶能力和界面相容性提高,储能模量、损耗模量和复数黏度提高。ATBC的加入,有利于进一步提高韧性、加工流动性和界面相容性,但使共混体系的结晶温度、熔融温度、相对结晶度及热稳定性明显下降。当EVAC-g-MAH为10份,ATBC为15份时,PLA/PBAT(80/20)共混体系的缺口冲击强度从4.3 kJ/m²达到50.4 kJ/m²,熔体流动速率从15.1 g/10 min提高到52.9 g/10 min。

关键词: 聚乳酸;聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯;乙烯-乙酸乙烯共聚物接枝马来酸酐;乙酰柠檬酸三丁酯;增容;增塑

中图分类号: TQ323 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2025)05-0042-08

EVAC-g-MAH compatibilizing and acetyl-tributylcitrate plasticizing PLA/PBAT blend

WANG Xiaojun, ZENG Anran, ZHANG Qinghai, WANG Yangtao, CHEN Ting

(Liming Vocational University School of New Materials and Shoes&Clothing Engineering, Quanzhou 362000, China)

Abstract : The blending of polylactic acid (PLA) and polyadipate-butylene terephthalate (PBAT) is an effective way to improve the brittleness and processability of PLA, but their poor compatibility leads to insufficient mechanical properties. PLA/PBAT/EVAC-g-MAH/ATBC blend system was prepared by melt extrusion using ethylene-vinyl acetate copolymer grafted with maleic anhydride (EVAC-g-MAH) as compatibilizer and acetyl-tributylcitrate (ATBC) as plasticizer. The effects of the dosage of EVAC-g-MAH and ATBC on the mechanical properties, flow properties, thermal stability, crystallization properties, rheological properties and morphology of the composites were investigated, which provided a theoretical basis for the development of high-performance degradable materials. The experimental results show that with the increase of EVAC-g-MAH content, the interface compatibility of the blend increases, and the reaction of the MAH group of EVAC-g-MAH with the polar group of PLA/PBAT is conducive to the improvement of thermal stability, crystallization ability and interface compatibility of PLA/PBAT blend system, as well as the improvement of energy storage modulus, loss modulus and complex viscosity. The addition of ATBC is beneficial to further improve the toughness, processing flow and interface compatibility, but crystallization temperature, melting temperature, relative crystallinity and thermal stability of the blend system are significantly decreased. when EVAC-g-MAH is 10 phr and ATBC is 15 phr, the notched impact strength of PLA/PBAT(80/20) blending system increases from 4.3 kJ/m² to 50.4 kJ/m², and the melt flow rate increases from 15.1 g/10 min to 52.9 g/10 min.

Keywords : polylactic acid ; polyadipate-butylene terephthalate ; ethylene vinyl acetate copolymer grafted with maleic anhydride ; acetyl tributyl citrate ; compatibilization ; plasticization

基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目(JAT210880)

通信作者: 王小君, 硕士研究生, 助教/工程师, 研究方向为功能高分子改性

收稿日期: 2025-03-06

引用格式: 王小君, 曾安然, 张青海, 等. EVAC-g-MAH增容和乙酰柠檬酸三丁酯增塑PLA/PBAT共混体系[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 42-49.

WANG Xiaojun, ZENG Anran, ZHANG Qinghai, et al. EVAC-g-MAH compatibilizing and acetyl-tributylcitrate plasticizing PLA/PBAT blend[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 42-49.

当前全球每年产生的市政固体废弃物总量约为20 t,且这一数字正伴随消费能力的增强而显著上升。值得注意的是,在废弃物构成中,源自石油提炼的合成聚合物材料如聚丙烯、聚氯乙烯等占比达到12%^[1]。此类高分子废弃物在生态系统中长期滞留,已导致复合型污染危机,因此,开发可生物降解塑料逐渐成为近年来学术界和工业界广泛关注的研究热点之一。

生物基可降解材料聚乳酸(PLA)凭借其降解效率高、强度适中、柔韧性良好和生物相容性好等特点,已经在食品接触级包装领域^[2]、医疗耗材、手术缝合线等医疗领域投入使用。然而,PLA较差的韧性极大限制了其应用。相比之下,聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)是兼具优异柔韧性和可生物降解的环境友好型材料,与PLA共混可以实现互补,达到增韧的效果^[3]。但PLA的高密度酯基结构使其呈现强极性特征;而PBAT因富含脂肪烃链段且酯基比例较低,表现出弱极性属性^[4],这种显著的极性差异导致两种材料在共混时界面结合力薄弱,材料性能下降。为获得具有良好性能PLA/PBAT共混物,可利用具有马来酸酐(MAH)、环氧官能团^[5-7]和甲基丙烯酸缩水甘油酯^[8]等反应性官能团的增容剂与聚合物中具有反应活性的羟基、羧基和氨基通过化学反应形成共价键来提高二者间的界面相容性。如刘统宇^[9]通过相容剂乙烯-乙酸乙烯酯共聚物接枝马来酸酐(EVAC-g-MAH)、乙烯-丙烯酸正丁酯(EBA)和马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物(POE-g-MAH)复配,提高PLA/PBAT的韧性,但是从流变性能可看出随相容剂的增加,聚合物的黏弹性增加,加工流动性有所下降。而通过在聚合物分子链间嵌入小分子增塑剂^[10-12],破坏原有分子间的氢键作用,并减少分子间的相互作用力,从而提高分子链的流动性,进而实现增塑目的,最终能提高PLA/PBAT共混体系的力学性质和加工性能。采用相容剂与增塑剂协同作用改性PLA/PBAT的研究较为少见。Phetwarotai等^[13]添加柠檬酸三乙酯(TEC)和甲基二异氰酸酯(TDI)作为PLA/PBAT的增塑剂和相容剂,研究发现在共混体系中加入TEC和TDI可以协同提高PLA/PBAT共混体系的抗冲击强度与相容性,但TDI具有一定毒性。

笔者以EVAC-g-MAH为相容剂,乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC)为增塑剂,对PLA/PBAT进行增容增

塑协同改性,采用反应熔融共混制备共混材料后,分析EVAC-g-MAH和ATBC对该多相体系的力学性能、热稳定性和流变性能的影响,为制备具有优异韧性和良好加工性的PLA/PBAT共混材料提供一种可行的策略。

1 实验部分

1.1 主要试剂及原材料

PLA:REVODE110,浙江海正生物材料股份有限公司;

PBAT:Ecoflex®F Blend C1200,德国巴斯夫股份公司;

EVAC-g-MAH:40-50,法国阿科玛公司;

ATBC:佛山今佳新材料科技有限公司。

1.2 实验仪器及设备

双螺杆挤出机:HTGD-20,广州市哈尔技术有限公司;

注塑机:SA600II/130,宁波海天塑机集团有限公司;

电子万能试验机:CMT6203,上海美特斯工业系统(中国)有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:ZRZ1452,深圳新三思材料检测有限公司;

摆锤式冲击试验机:ZBC1400-2,上海美特斯工业系统(中国)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 1,瑞士梅特勒(Mettler Toledo)公司;

热重分析(TG)仪:SF/1100,瑞士梅特勒(Mettler Toledo)公司;

旋转流变仪:DHR-2,美国TA仪器公司;

扫描电子显微镜(SEM):Merlin Compact,德国卡尔蔡司公司。

1.3 样品的制备

将PLA,PBAT原料在90℃烘干12 h进行干燥处理;按照表1中配方比例,将ATBC,PLA,PBAT和EVAC-g-MAH进行称量,在高速混合机中进行混合;而后通过双螺杆挤出机挤出造粒,各段温度设置为160,165,165,165,175,180,180,175,175℃。将熔融共混得到的粒子于90℃干燥后,注塑得到测试所需的标准样条,注塑温度为160,175,175,165℃。

1.4 测试与表征

力学性能测试:根据GB/T 1040.2-2022,在室

表1 PLA/PBAT共混体系的配方
Tab. 1 Formulation of PLA/PBAT blend system

Samples	PLA	PBAT	EVAC-g-MAH	ATBC
ABEA0000	80	20	0	0
ABEA0500	80	20	5	0
ABEA0800	80	20	8	0
ABEA1000	80	20	10	0
ABEA1005	80	20	10	5
ABEA1010	80	20	10	10
ABEA1015	80	20	10	15

温下采用电子万能试验机对试样进行拉伸性能测试,拉伸速度设定为50 mm/min;根据GB/T 9341-2008,用电子万能试验机实施三点弯曲性能测试;根据GB/T 1043.1-2008,利用摆锤式冲击试验机测定V型缺口试样冲击强度。

MFR测试:根据GB/T 2408-2008,在190℃/2.16 kg条件下进行MFR测试,切断间隔时间为10 s,记录每组的MFR。

TG测试:在50 mL/min的N₂环境中采用20℃/min的升温程序。将5~10 mg的样品从室温下升温到600℃,测试其质量损失行为。

DSC分析:在50 mL/min的N₂环境中采用10℃/min升温程序测试,将5~7 mg左右的样品在25~220℃下测试其熔融结晶行为。其中结晶度可通过公式(1)计算:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为熔融焓,J/g; ΔH_0 为94 J/g, ΔH_0 为100%结晶的纯PLA对应的熔融焓值。

流变性能测试:试样采用直径25 mm、厚度1 mm的夹具压制而成。试验在旋转流变仪上实施,设定测试温度为210℃,频率扫描区间为0.1~628 rad/s,应变为1%。

SEM形貌表征:将7组PLA/PBAT共混体系样条浸没于液氮中5 min,取出后快速断裂制样,并进行喷金处理。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

未增容前的PLA/PBAT,相容性较差,材料整体的力学性能较低,因此以EVAC-g-MAH为相容剂,ATBC为增塑剂,探究两种助剂的添加比例对共混体系力学性能的影响。PLA/PBAT共混体系的力学性能如图1所示。从图1a可看出,EVAC-g-MAH加入后,共混体系的拉伸强度显著降低,这主要是因

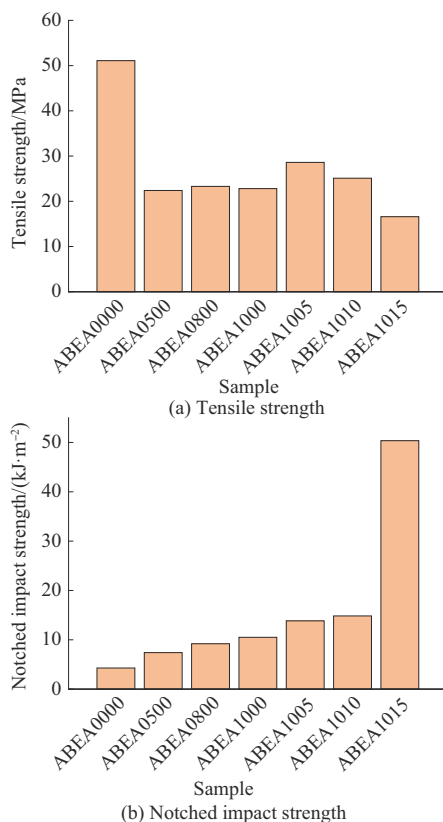


图1 PLA/PBAT共混体系的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of PLA/PBAT blend system

为EVAC-g-MAH本身主链具有高弹性,其加入可能在PLA/PBAT基体中形成分散的软相,这些软相区域会在受力时优先形变,导致宏观刚性下降。但图1b可看出体系的缺口冲击强度从4.3 kJ/m²提高到10.5 kJ/m²,这可能是EVAC-g-MAH提高了PLA与PBAT两相的相容性,使得共混体系在受到冲击时能吸收更多的能量。同时发现少量增塑剂ATBC对共混体系的拉伸强度有帮助,但当ATBC用量为15份时,共混体系的拉伸强度下降明显,而缺口冲击强度从10.5 kJ/m²进一步提高到50.4 kJ/m²,这可能是因为ATBC有利于降低PLA、PBAT的氢键作用,增加了分子链运动,极性基团接触率更大,有利于提高两相的相容。

2.2 熔体流动性能分析

PLA/PBAT共混体系的MFR如图2所示,从图2可看出,EVAC-g-MAH对共混体系的MFR有一定的提升,MFR从15.1 g/10 min提高到19.0 g/10 min,这也说明了EVAC-g-MAH对材料相容性提升的同时,并不影响材料加工流动性。而随着增塑剂ATBC含量的增加,共混体系的流动性逐渐提高。尤其ATBC质量分数为15%时,共混体系的MFR从

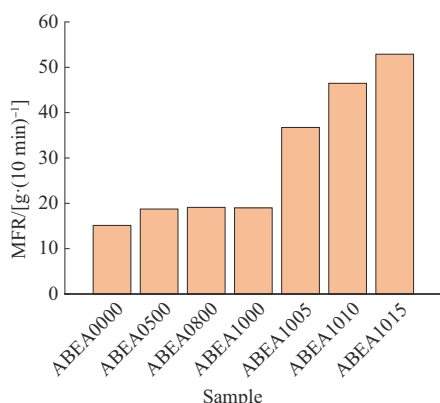


图2 PLA/PBAT 共混体系的 MFR

Fig. 2 MFR of PLA/PBAT blend system

19.0 g/10 min 提高到 52.9 g/10 min, 提升了 178.4%。ATBC 的乙酰基能额外增大 PLA, PBAT 分子链之间的自由体积, 进一步屏蔽 PLA, PBAT 链上的偶极子^[14], 使 PLA/PBAT/EVAC-g-MAH 各相分子链不易缠结, 有利于 PLA, PBAT 链段的运动, 使得共混体系的流动性得到较大的提升。

2.3 SEM 分析

图 3 是 PLA/PBAT 共混体系低温断面的 SEM 图 (500 倍), 从图 3a 可看出, 未添加相容剂的 PLA/PBAT (80/20) 材料, 其 PBAT 分散相明显且大小不一, 从图 3b~图 3d 可看出, 随着相容剂 EVAC-g-MAH 含量的增加, 分散相颗粒大小有明显减小, 这说明了 EVAC-g-MAH 的加入有利两相相容性增加, PBAT 分散相分布更为均匀, 进一步佐证了随着 EVAC-g-MAH 的加入, 韧性得到提升的原因。

图 4 是 PLA/PBAT 共混体系低温断面的 SEM 图 (2 000 倍)。从图 4 可看出由于 EVAC-g-MAH 加入,

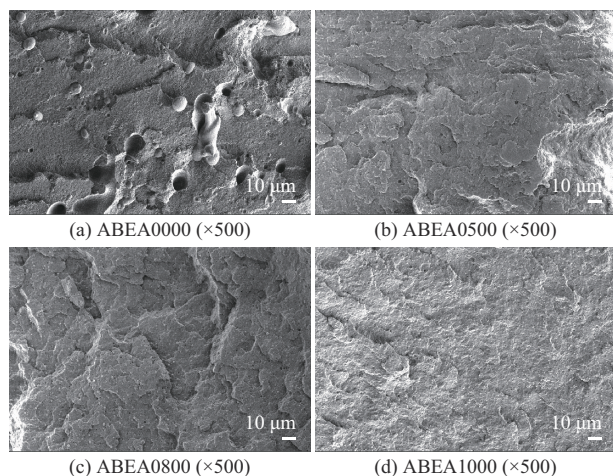


图3 PLA/PBAT 共混体系低温断面的 SEM 照片

Fig. 3 SEM photos of low-temperature brittle fracture of PLA/PBAT blend system

PBAT 的分散相尺寸明显变小, 这说明 MAH 基团与 PLA/PBAT 的极性基团反应, 形成共价键界面, 抑制相分离。而 ATBC 的加入, 使分散相尺寸变大, 这可能是因为 ATBC 的加入使得 PLA 的黏度降低, 挤出过程剪切下降, 降低了 PBAT 的分散效果。但从图中发现随着 ATBC 的增加, 两相的界面明显模糊不清, 类似被包裹的分散相逐渐增多。因为 ATBC 分布于 PLA/PBAT 界面, 降低界面黏度, 促进 EVAC-g-MAH 的均匀分散, 这也说明 ATBC 有利于辅助提高 PLA 与 PBAT 相容性。

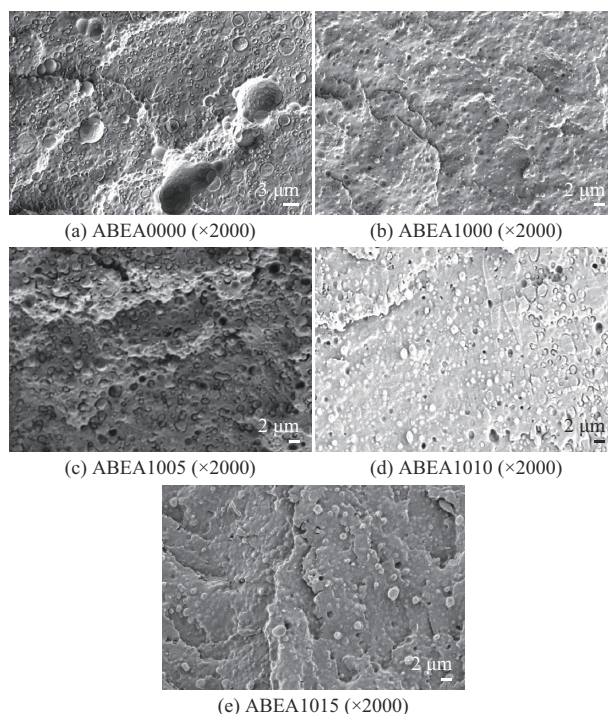
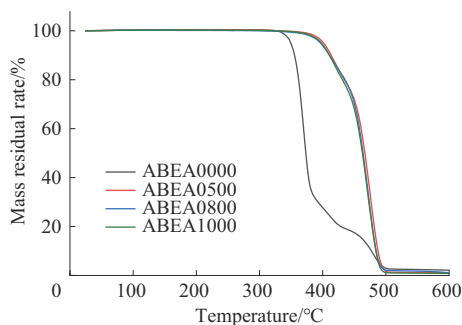


图4 PLA/PBAT 共混体系低温断面的 SEM 照片

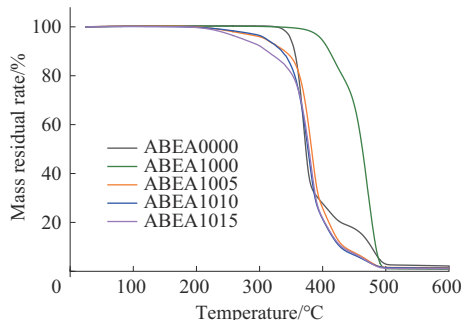
Fig. 4 SEM photos of low-temperature brittle fracture of PLA/PBAT blend system

2.4 TG 分析

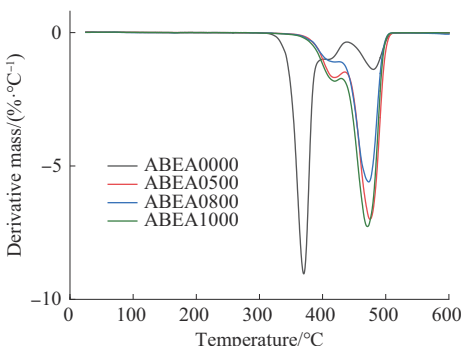
PLA/PBAT 共混体系 TG 曲线及数据见图 5 及表 2。从图 5a、图 5c 可看出, PLA/PBAT 共混物有两个明显的失重平台。320~410 °C 分解区间对应的是 PLA, PBAT 是脂肪族和芳香族共聚物, 其分解温度比 PLA 高^[15], 分解区间为 371.1 ~ 477 °C。从图 5a 和图 5c 的 ABEA0500~ABEA1000 曲线可看出, 加入 EVAC-g-MAH 后, 共混材料起始分解温度大大提高, 而 PLA 相最大分解速率温度明显向高温方向移动, PBAT 相最大分解速率温度有所降低。且从表 2 可以发现由于 EVAC-g-MAH 的加入, 共混体系的分解温度都有所提升, 共混体系整体热稳定性有较大提高。这说明了 EVAC-g-MAH 作为相容剂, 与 PLA



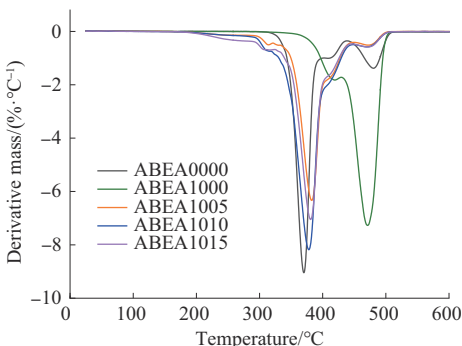
(a) TG curves of PLA/PBAT blend system without plasticizer



(b) TG curves of PLA/PBAT blend system with plasticizer



(c) DTG curves of PLA/PBAT blend system without plasticizer



(d) DTG curves of PLA/PBAT blend system with plasticizer

图5 PLA/PBAT共混体系的TG和DTG曲线

Fig. 5 TG and DTG curves of PLA/PBAT blend system

和PBAT发生相互作用,使得PLA链段在热分解过程中受到更多的稳定化效应,从而提高了PLA相的热分解温度。

从图5b、图5d可看出,ATBC加入前后,PLA/PBAT/ EVAC-g-MAH的曲线变化较大。ATBC质量分数从0增加到10%时,PLA/PBAT/ EVAC-g-MAH

表2 PLA/PBAT共混体系的TG曲线数据

Tab. 2 TG curves data of PLA/PBAT blend system

Samples	$T_{5\%}$	$T_{50\%}$	$T_{90\%}$
ABEA0000	349.3	373.3	477
ABEA0500	401.3	466.5	487.5
ABEA0800	396.5	463.8	484.5
ABEA1000	398	462.8	484.2
ABEA1005	309.5	382.5	434.2
ABEA1010	310.8	376.5	427.8
ABEA1015	273.7	378.2	430.5

Notes: $T_{5\%}$ is 5% weight loss temperature; $T_{50\%}$ is 50% weight loss temperature; $T_{90\%}$ is 90% weight loss temperature.

共混体系的失重5%温度($T_{5\%}$)从398℃降低到273.7℃、失重50%温度($T_{50\%}$)从462.8℃降低到378.2℃,失重90%温度($T_{90\%}$)以及热分解失重最快温度($T_{\max}$)也逐渐下降。

从起始分解温度来看,ATBC添加量超过15份,最低热分解温度低于273.7℃,这可能是小分子增塑剂的酯基官能团降解,产生羟基,而这些羟基能促进PLA和PBAT基体的降解,从而导致材料的热稳定性降低^[16],因此从材料熔融加工性能方面考虑,ATBC的添加量不宜超过15份。

2.5 DSC分析

图6为PLA/PBAT共混体系的DSC曲线,根据降温曲线和二次升温曲线的峰值和熔融焓(ΔH_m)计算结晶度 X_c ,结果列于表3中。ABEA0000~ABEA1000为EVAC-g-MAH(0~10份),由图6a可知,加入EVAC-g-MAH后共混体系的结晶温度(T_c)从99.2℃提高到113.9℃,共混体系的结晶能力有所提高。少量的相容剂EVAC-g-MAH有利于PLA分子链在更高温度下有效排列和结晶,体系结晶度(X_c)从24.32%提高到68.65%。但EVAC-g-MAH含量增加,其马来酸酐基团与PLA和PBAT的末端羟基或羧基反应,形成酯键或酰胺键,从而增强了PLA和PBAT之间的界面结合力,限制PLA链段运动能力,使PLA结晶区变小^[17],使相对结晶度有所下降。图6b的ABEA0000曲线中PBAT的吸热峰(约130℃)仍明显存在,这表明了未添加相容剂,PLA与PBAT的相互作用较弱,这在很多文献中均有提到^[18]。但EVAC-g-MAH加入后,曲线的吸热峰往高温方向移动,并且PBAT的熔融峰也消失,结合降温曲线,进一步表明了共混体系在EVAC-g-MAH的增容作用下,PLA与PBAT两者的界面结合力增加,使得PBAT的结晶能力受限。而ATBC的加入,共混体系的 T_c 和熔融温度(T_m)明显降低了,PLA的结晶度 X_c

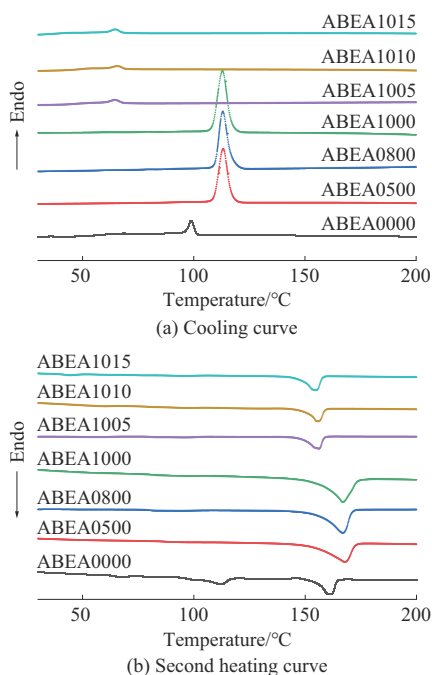


图6 PLA/PBAT 共混体系的DSC 曲线

Fig. 6 DSC curves of PLA/PBAT blend system

表3 PLA/PBAT 共混体系的DSC 曲线数据

Tab. 3 DSC curves data of PLA/PBAT blend system

Samples	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
ABEA0000	99.2	161.1	24.62	26.19%
ABEA0500	113.8	167.5	64.53	68.65%
ABEA0800	113.9	167.3	57.93	61.63%
ABEA1000	113.8	167.2	61.22	65.13%
ABEA1005	64.6	156.0	22.67	24.12%
ABEA1010	65.6	155.2	24.67	26.24%
ABEA1015	65.0	154.5	25.32	26.94%

Notes: T_c is crystallization temperature; T_m is melting temperature; X_c is relative crystallinity; ΔH_m is melting enthalpies.

也明显下降,说明增塑剂 ATBC 削弱了分子链间的相互作用力,提高了 PLA 链段运动能力,但也造成了分子链段难以排列规整,结晶度下降^[19]。

2.6 流变性能分析

图7为 PLA 及 PLA/PBAT 共混体系的流变行为曲线,图7a、图7b、图7c分别是材料储能模量(G')、损耗模量(G'')、复数黏度(η^*)和角频率(ω)的关系曲线。可以看出, EVAC-g-MAH 的加入使 PLA/PBAT 共混体系的 G' , G'' 和 η^* 都增加,这说明 EVAC-g-MAH 的马来酸酐基团与 PLA, PBAT 的端羟基形成酯键或酰胺键,原位产生增容作用,增强了合金相界面间的结合强度,两相界面摩擦增加,使材料的黏弹性增大。从图7c中可看出,共混体系的 η^* 随着 ω 的增长而降低,说明剪切后的 PLA/PBAT 混合体系熔体流动性增强,属于典型的假塑性流体。而增塑剂

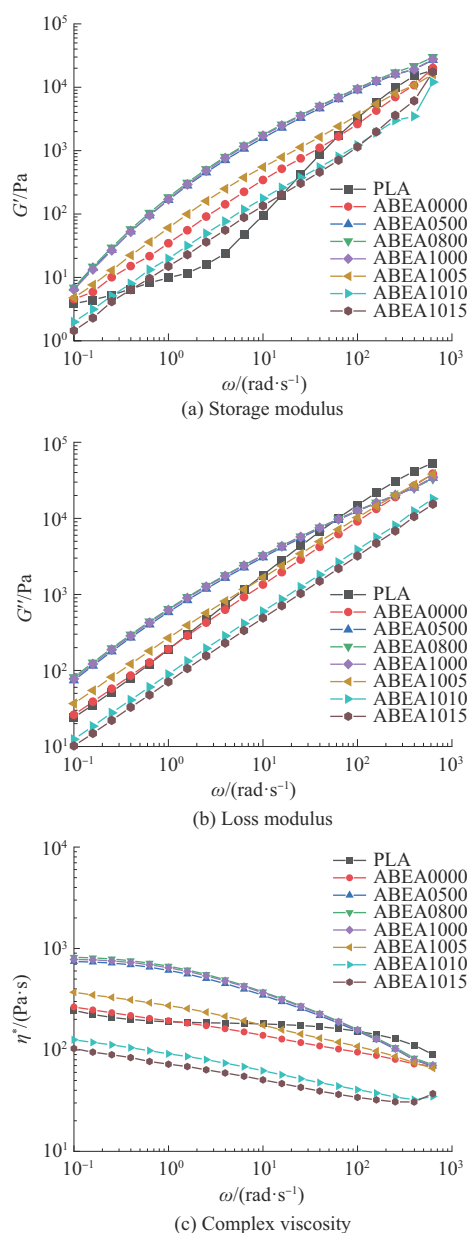
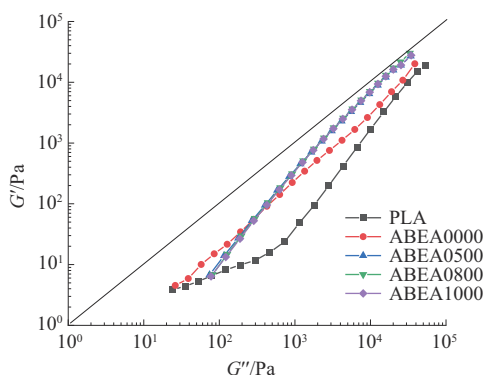


图7 PLA 及 PLA/PBAT 共混体系的流变行为曲线

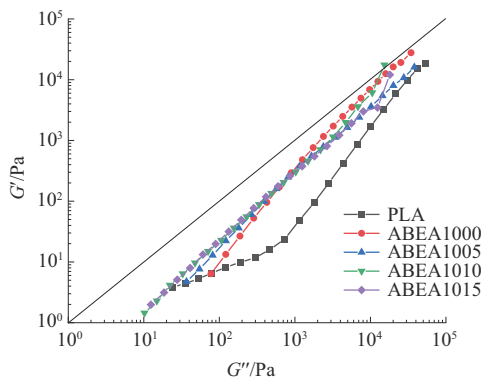
Fig. 7 Rheological behavior curve of PLA and PLA/PBAT blend system

ATBC 的加入,材料的 η^* 呈现逐渐下降。说明 ATBC 增加了 PLA/PBAT/EVAC-g-MAH 的链段流动性,减少了链段间的运动阻力,改善了其加工性能。

图8为 PLA 及 PLA/PBAT 共混体系的 Han 曲线,用来表征材料的固液转变行为。PLA/PBAT 的 G'' 大于 G' ,因此在扫描频率范围内表现出类似液体的特征。但随着 EVAC-g-MAH 的加入,共混体系的曲线逐渐接近固液平衡点($G' = G''$),这是因为共混体系内部的分子链段运动的摩擦损耗降低了,进一步说明 EVAC-g-MAH 与 PLA, PBAT 形成酯键或酰胺键,增强了相界面间的结合强度。但 ATBC 的加



(a) Han curves of PLA and PLA/PBAT blendsystem without plasticizer



(b) Han curves of PLA and PLA/PBAT blendsystem with plasticizer

图8 PLA及PLA/PBAT共混体系的Han曲线

Fig. 8 Han curves of PLA and PLA/PBAT blend system

入,提高了材料的流动性,材料的曲线整体回归类似液体的特征。

3 结论

(1) EVAC-g-MAH的加入降低了PLA/PBAT共混体系的强度,但韧性有所提升。添加ATBC后,进一步提高了材料韧性和加工流动性,当ATBC含量为15份时,PLA/PBAT/EVAC-g-MAH共混体系的缺口冲击强度达到50.4 kJ/m²,提高了380%,MFR提升了178.4%。

(2) EVAC-g-MAH对PLA/PBAT共混体系的增容作用使得共混体系热稳定性有所提高,且有利于PLA的结晶;而随着ATBC的增加,SEM图中两相界面逐渐模糊,共混体系的相容性显著增加,但 T_c 、 T_m 和 X_c 明显下降,此外共混体系的热稳定性也有受影响,尤其当ATBC含量为15份时, $T_{5\%}$ 下降到273.7℃,影响材料后续的加工稳定性。

(3) EVAC-g-MAH的增容作用使得PLA/PBAT共混体系的 G' 、 G'' 和 η^* 提高,并有类固体特征转变的趋势。ATBC使得共混体系分子链段运动增加,分子间作用力削弱,因此共混体系 η^* 下降,材料流动性增加。

参考文献

- [1] RUCH V M, SUNIL K. Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation[J]. A comprehensive, 2019, 208:65–76.
- [2] 赵素芬,王子扬,李新芳. 聚乳酸(PLA)包装材料高阻隔改性研究进展[J]. 塑料包装, 2023, 33(6):1–4.
ZHAO Sufen, WANG Ziyang, LI Xinfang. Research progress on high barrier modification of polylactic acid(PLA)packaging materials[J]. Plastics Packaging, 2023, 33(6):1–4.
- [3] 付倩,郑雨欣,张雪蕊,等. 成核剂和扩链剂对PLA/PBAT共混体系性能影响[J]. 塑料科技, 2021, 49(12):42–46.
FU Qian, ZHENG Yuxin, ZHANG Xuerui, et al. Effects of nucleating agent and chain extender on properties of PLA/PBAT blends[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(12):42–46.
- [4] 史向阳,夏学莲,赵海鹏,等. PBAT/PLA共混体系反应性增容机理研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(3):61–72.
SHI Xiangyang, XIA Xuelian, ZHAO Haipeng, et al. Research progress of reactive compatibilization mechanism of PBAT/PLA blend system[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(3):61–72.
- [5] 石慧. 多元环氧扩链剂对PLA/PBAT共混物及PLA/PBAT/淀粉复合材料微观形貌及性能的影响[D]. 海口:海南大学, 2017.
SHI Hui. Effect of multi-epoxy chain extender on microstructure and properties of PLA/PBAT blends and PLA/PBAT/starch composites[D]. Haikou:Hainan University, 2017.
- [6] FARIAS DA SILVA J M, SOARES B G. Epoxidized cardanol-based prepolymer as promising biobased compatibilizing agent for PLA/PBAT blends[J]. Polymer Testing, 2021, 93. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106889.
- [7] HAN Y, SHI J W, MAO L X, et al. Improvement of compatibility and mechanical performances of PLA/PBAT composites with epoxidized soybean oil as compatibilizer[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(50):21 779–21 790.
- [8] WU N J, ZHANG H. Mechanical properties and phase morphology of super-tough PLA/PBAT/EMA-GMA multicomponent blends[J]. Materials Letters, 2017, 192:17–20.
- [9] 刘统宇. 协同增容PLA/PBAT复合体系的制备与性能研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.
LIU Tongyu. Study on preparation and properties of co-compatible PLA/PBAT composite system. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [10] 和玉光,郝思嘉,田俊鹏,等. PBAT含量对PLA基可降解共混切片及复合熔喷非织造布性能的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(3):82–89.
HE Yuguang, HAO Sijia, TIAN Junpeng, et al. Effect of PBAT content on performance of PLA based degradable blend slice and composite meltblown nonwovens[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(3):82–89.
- [11] 岳军锋,张洋洋. 异山梨醇基增塑剂与聚乳酸相容性对其结晶

- 形态的影响初探[J]. 塑料科技, 2023, 51(4):50–53.
- YUE Junfeng, ZHANG Yangyang. Preliminary discussion on crystalline morphology of polylactic acid affected by compatibility between isosorbide-based plasticizers and polylactic acid[J]. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(4):50–53.
- [12] MAIZA M, HAMAM A. Toughened Poly (lactic acid)/Poly (ϵ -caprolactone) blend with triethyl citrate (TEC) and polyethylene glycol (PEG₃) [J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, 61(3):276–282.
- [13] PHETWAROTAI W, PHUSUNTI N, AHT-ONG D. Preparation and characteristics of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polylactide blend films *via* synergistic efficiency of plasticization and compatibilization[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2019, 37(1):68–78.
- [14] 彭少贤, 蔡小琳, 胡欢, 等. 环境友好型增塑剂增韧聚乳酸的最新研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(15):2 617–2 623.
- PENG Shaoxian, CAI Xiaolin, HU Huan, et al. Latest research progress in polylactic acid toughened by environmental friendly plasticizer[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(15):2 617–2 623.
- [15] 姜玉骏, 孙树林. MMA-co-GMA 增容 PBAT/PLA 共混材料结构与性能[J]. 塑料工业, 2023, 51(11):141–147.
- JIANG Yujun, SUN Shulin. Structure and properties of PBAT/PLA blends compatibilized by MMA-co-GMA copolymer[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(11):141–147.
- [16] LI F F, ZHANG C L, WENG Y X. Improvement of the gas barrier properties of PLA/OMMT films by regulating the interlayer spacing of OMMT and the crystallinity of PLA[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(30):18 675–18 684.
- [17] 刘志刚, 颜祥禹, 陈波, 等. PLA/E-MA-GMA/PBS 复合材料力学及生物分解性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(4):99–103.
- LIU Zhigang, YAN Xiangyu, CHEN Bo, et al. Study on mechanical and biodegradation performance of PLA/E-MA-GMA/PBS composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(4): 99–103.
- [18] 夏学莲, 史向阳, 赵海鹏, 等. PLA/PBAT 共混体系的反应性增容[J]. 塑料工业, 2023, 51(3):67–75, 89.
- XIA Xuelian, SHI Xiangyang, ZHAO Haipeng, et al. Reactive compatibilization of PLA/PBAT blends[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(3):67–75, 89.
- [19] 付倩, 郑雨欣, 黄兆阁. PLA/PBAT/木薯淀粉复合材料的制备与性能[J]. 塑料, 2023, 52(6):82–87.
- FU Qian, ZHENG Yuxin, HUANG Zhaohe. Preparation and properties of PLA/PBAT/cassava starch composite[J]. *Plastics*, 2023, 52(6):82–87.

(上接第 41 页)

- [11] 蔡志锋, 王庆印, 刘绍英, 等. 用于合成聚对苯二甲酸乙二醇酯的 $\text{KF}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂研究[J]. 高分子学报, 2018, 49(9): 1 184–1 193.
- CAI Zhifeng, WANG Qingyin, LIU Shaoying, et al. Study of $\text{KF}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst in synthesis of poly(ethylene terephthalate) by esterification[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018, 49(9):1 184–1 193.
- [12] 蔡志锋, 刘绍英, 王庆印, 等. 用于合成聚对苯二甲酸乙二醇酯的 Zn/Al 复合氧化物催化剂[J]. 石油化工, 2018, 47(9):908–916.
- CAI Zhifeng, LIU Shaoying, WANG Qingyin, et al. Synthesis of polyethylene terephthalate by esterification over Zn/Al composite oxides[J]. *Petrochemical Technology*, 2018, 47(9):908–916.
- [13] 黄胶, 王华, 韩金玉, 等. 钾掺杂的锐钛矿 TiO_2 催化丙酮基化反应[J]. 高校化学工程学报, 2024, 38(3):459–467.
- HUANG Jiao, WANG Hua, HAN Jinyu, et al. Ketonization of propionic acid on potassium-doped anatase TiO_2 catalysts[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2024, 38(3):459–467.
- [14] GUTIÉRREZ-ALEJANDRE A, TROMBETTA M, BUSCA G, et al. Characterization of alumina-titania mixed oxide supports I. TiO_2 -based supports[J]. *Microporous Materials*, 1997, 12(1/2/3): 79–91.
- [15] 刘近, 杨丽娜, 白金, 等. 模板法制备 TiO_2 - Al_2O_3 载体对蒽加氢催化剂的影响[J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(4):975–982.
- LIU Jin, YANG Lina, BAI Jin, et al. Effects of TiO_2 - Al_2O_3 prepared by a template method on catalysts for naphthalene hydrogenation[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2018, 32(4):975–982.
- [16] WANG J, ZHANG S Q, HAN Y M, et al. $\text{UiO}-66(\text{Zr}/\text{Ti})$ for catalytic PET polycondensation[J]. *Molecular Catalysis*, 2022, 532. DOI:10.1016/j.mcat.2022.112741.
- [17] LIN Q S, GAO F, WANG Y J, et al. Ethylene glycol-soluble Ti/Mg -citrate complex catalyst for synthesis of high intrinsic viscosity poly(ethylene terephthalate) [J]. *Polymer*, 2022, 246. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.124741.
- [18] LI X G, SONG G, HUANG M R. Cost-effective sustainable synthesis of high-performance high-molecular-weight poly(trimethylene terephthalate) by eco-friendly and highly active Ti/Mg catalysts[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(3):2 181–2 195.
- [19] CHEN L B, TAI L P, WANG X K, et al. Application of a rare earth catalyst in polyethylene glycol terephthalate and low-melting polyethylene glycol terephthalate[J]. *Polymer Science, Series B*, 2023, 65(5):595–604.
- [20] LENNY V D, LOBKE D V, SANDRA V V, et al. Catalyst-free single-step solution polycondensation of polyesters: toward high molar masses and control over the molar mass range macromolecules[J]. *Macromolecules*, 2023, 56:2 863–2 877.