

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.10.023

成核剂和扩链剂对PLA/PBAT共混体系性能的影响

刘凤玉

[山西省化工研究所(有限公司),太原 030006]

摘要: 为改善聚乳酸(PLA)/聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)共混体系相容性以及提高共混体系的应用性能,将扩链剂苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(KL-E4370)和成核剂癸二酸二苯基二酰肼(TMC-300)通过熔融共混添加到PLA/PBAT共混物中,制备了PLA/PBAT/KL-E/TMC共混体系。采用傅里叶变换红外光谱仪对扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300进行表征;采用扫描电子显微镜研究扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300的添加对PLA/PBAT共混体系微观结构的影响;通过热重分析仪、差式扫描量热仪和拉力试验机研究了扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300对PLA/PBAT共混体系热稳定性、结晶性能以及拉伸性能等的影响。结果表明,扩链剂KL-E4370的加入改善了PLA与PBAT基体之间的相容性,PLA/PBAT共混体系界面的孔洞和裂纹明显减少,应力传递效率提高,拉伸强度上升,从未加扩链剂的42.7 MPa提高到47.6 MPa,扩链剂KL-E4370对PLA/PBAT共混体系的热稳定性影响不大;当同时加入扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300后,PLA/PBAT/KL-E/TMC的结晶性能得到明显的改善,与PLA/PBAT相比,冷结晶现象几乎完全消失,结晶温度提高了31.50℃,结晶度提高了3倍多。

关键词: 聚乳酸;聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯;结晶性能;扩链剂;成核剂

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)10-0154-06

Effects of Nucleating Agent and Chain Extender on Properties of PLA/PBAT Blends

Liu Fengyu

(Shanxi Chemical Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract : In order to promote the compatibility of polylactic acid (PLA)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends and improve the application properties of the blends, the chain extender styrene-methyl methacrylate-glycidyl methacrylate copolymer (KL-E4370) and nucleating agent sebacic acid diphenyl dihydrazide (TMC-300) were added into PLA/PBAT blends by melt blending for preparing PLA/PBAT/KL-E/TMC blends. The chain extender KL-E4370 and nucleating agent TMC-300 were characterized by fourier transform infrared spectrometer. The effect of chain extender KL-E4370 and nucleating agent TMC-300 on the microstructure of PLA/PBAT blends was analyzed by scanning electron microscopy. The influences of chain extender KL-E4370 and nucleating agent TMC-300 on the thermal stability, crystallization property and tensile properties of PLA/PBAT blends were studied by thermogravimetric analyzer, differential scanning calorimeter and tensile testing machine, respectively. The results show that the addition of chain extender KL-E4370 improves the compatibility between PLA and PBAT matrix. The pores and cracks at the interface of PLA/PBAT blends are significantly reduced, the stress transfer efficiency is improved, and the value of tensile strength is increased from 42.7 MPa (without chain extender) to 47.6 MPa. Meanwhile, the addition of chain extender KL-E4370 has little effect on the thermal stability of PLA/PBAT blends. When the chain extender KL-E4370 and nucleating agent TMC-300 are added into PLA/PBAT blends at the same time, the crystallization property of PLA/PBAT/KL-E/TMC is importantly improved, the cold crystallization phenomenon is almost disappeared completely, the crystallization temperature is increased by 31.50℃ and the crystallinity is increased by more than 3 times compared with that of PLA/PBAT blends.

Keywords : polylactic acid ; poly (butylene adipate-co-terephthalate) ; crystallinity property ; chain extender ; nucleating agent

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项(202104021301027),山西省专利转化专项计划(202202112)

通信作者: 刘凤玉,高级工程师,硕士,主要从事聚合物功能化改性研究

收稿日期: 2023-07-11

引用格式: 刘凤玉.成核剂和扩链剂对PLA/PBAT共混体系性能的影响[J].工程塑料应用,2023,51(10):154-159,166.

Liu Fengyu. Effects of nucleating agent and chain extender on properties of PLA/PBAT blends[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51 (10): 154-159, 166.

近年来,聚乳酸(PLA)/聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)共混物的开发和研究受到了越来越多的关注。PLA 是一种完全可生物降解的热塑性聚酯,具有资源与环境的双重优势,是近几年研究最多的可降解高分子材料之一^[1]。PLA 凭借其良好的生物相容性及高透明度等特性,在生物医药、建筑材料、航空航天等领域有广阔的发展前景。但 PLA 依旧存在一些缺陷,如脆性大、耐热性差、结晶周期长,极大地限制了 PLA 在生活日用、汽车、建筑、电子电器等领域的应用^[2]。PBAT 作为一种新型的石油基可降解共聚酯,既含有柔性的脂肪链段,又包含刚性的苯环结构,具有优异的力学性能和良好的热稳定性,可广泛应用于包装、医用和农业地膜等领域^[3]。PLA/PBAT 共混物结合了 PLA 与 PBAT 两者的优点,实现了性能的互补,具有广泛的应用前景。潘晓娣等^[4]研究了 PLA/PBAT 共混物的熔体流动性能,结果表明 PLA/PBAT 共混物为非牛顿流体,其黏流活化能值均大于 PLA 和 PBAT 的数值,适用于熔喷布制备工艺。然而 PLA/PBAT 共混物呈两相结构,彼此相容性差,影响共混体系的性能。常规的增容剂是通过物理增容的方式改善共混体系的相容性,是在相界面处形成氢键、范德华力等作用,增容效果相对较差。国内外学者对 PLA/PBAT 共混物体系做了大量研究,发现添加反应型增容剂不仅操作简单,并且可使体系的相容性得到改善,性能明显提高,因而实用价值较高,可操作性强^[5]。扩链剂 KL-E4370 是一种带有活性环氧基团的反应型增容剂,王冬等^[6]将扩链剂 KL-E4370 与 PLA/PBAT 共混体系熔融共混,当扩链剂 KL-E4370 质量分数大于 2% 时,共混体系出现明显的支化结构,拉伸强度和断裂伸长率提高,但冷结晶能力减弱。为提高 PLA/PBAT 共混体系的结晶能力^[7],通过添加各种成核剂来改善体系的结晶度和耐热性能。成核剂 TMC-300 是一种新型的 PLA 专用成核剂,能显著提高结晶温度,缩短制品的成型周期^[8]。

综上所述,为改善 PLA/PBAT 共混体系的相容性,提高其结晶度,笔者以 PLA 和 PBAT 为基体,扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 作为改性剂,制备了 PLA/PBAT 共混体系,研究在不同的升温速率下 PLA/PBAT 共混体系的热分解动力学以及非等温条件下 PLA/PBAT 共混体系的结晶行为,同时也探究了扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 对 PLA/

PBAT 共混体系力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA:REVODE 110,浙江海正生物材料股份有限公司;

PBAT:TH801,新疆蓝山屯河科技股份有限公司;

扩链剂苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(KL-E4370)和成核剂癸二酸二苯基二酰肼(TMC-300):山西省化工研究所(有限公司)。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:TSH-25 型,南京创博机械设备有限公司;

注塑机:MA1200II/370 型,海天塑机集团有限公司;

万能拉力机:M10 型,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spectrum 100 型,美国 Perkin Elmer 公司;

热重(TG)分析仪:TGA-1 型,瑞士梅特勒-托利多公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-1 型,瑞士梅特勒-托利多公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU-70 型,日本 Hitachi 公司。

1.3 PLA/PBAT 共混体系的制备

将 PLA 和 PBAT 在 60 °C 干燥箱内干燥 6 h;分别将 PLA, PBAT 及扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 按表 1 配方经双螺杆挤出机挤出混合造粒,得到 PLA/PBAT 共混体系粒料,其中,双螺杆挤出温度设定为 180, 190, 190, 180 °C,主机转速为 150 r/min;将粒料置于 60 °C 烘箱中干燥 24 h,备用。将干燥后的 PLA/PBAT 共混体系粒料通过注塑机在注塑温度 180 °C、注塑压力 0.6 MPa 下注塑成标准试样。

表 1 PLA/PBAT 共混体系各组分质量分数 %

样品代号	PLA/PBAT	KL-E4370	TMC-300
PLA/PBAT	100	0	0
PLA/PBAT/KL-E	99	1	0
PLA/PBAT/KL-E/TMC	98	1	1

注:PLA 与 PBAT 质量比为 4:1。

1.4 性能测试与结构表征

断面形貌表征:将样品在液氮中脆断,对断面喷金,采用 SEM 观察断面形貌。

FTIR测试:采用溴化钾压片方法,测试范围700~4 000 cm^{-1} ,步长4 cm^{-1} 。

TG测试:样品质量约5~10 mg,采用 N_2 氛围,流量为50 mL/min,测试温度范围为30~600 $^{\circ}\text{C}$,升温速率分别为5, 10, 15, 20, 25 K/min。采用动态热降解动力学分析中的Kissinger方法对PLA/PBAT共混体系的热分解行为进行分析,Kissinger法反映的是在某一升温速率下聚合物降解过程中的表观活化能与最大分解速率温度之间的关系^[9],其公式见式(1)。

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_{\max}^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) + \ln\left[n(1 - \alpha_{\max})^{n-1}\right] - \frac{E}{RT_{\max}} \quad (1)$$

式中: β 为升温速率; $T_{\max}$ 为在某一 β 下TG曲线的最大分解速率温度,即DTG曲线峰值所对应的温度; $n(1 - \alpha_{\max})^{n-1} \approx 1$,与 β 无关; E 为活化能; A 为指前因子; R 为摩尔气体常数, $R=8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ 。

以 $\ln(\beta/T_{\max}^2)$ 为纵坐标, $1000/T_{\max}$ 为横坐标,通过 $\ln(\beta/T_{\max}^2)$ 对 $1000/T_{\max}$ 作图,得到Kissinger曲线,根据Kissinger曲线的斜率和截距可计算出表观活化能和指前因子。

DSC测试:样品质量约5~10 mg,在 N_2 氛围下,先将样品加热至190 $^{\circ}\text{C}$ 并在190 $^{\circ}\text{C}$ 下保温5 min以清除样品的热历史。之后将样品从190 $^{\circ}\text{C}$ 冷却至35 $^{\circ}\text{C}$,冷却速率为10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;然后以10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从35 $^{\circ}\text{C}$ 再加热至190 $^{\circ}\text{C}$ 。采用非等温下的DSC曲线对PLA/PBAT共混体系的结晶动力学进行分析,PLA/PBAT共混体系的结晶度由式(2)计算。

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_c 为结晶度,单位%; ΔH_m 为样品的熔融焓,单位J/g; ΔH_{cc} 为样品的冷结晶焓,单位J/g; ΔH_0 为PLA在100%结晶时的熔融焓,其值为93.6 J/g^[10]。

拉伸性能测试:按GB/T 1040.2-2006,以10 mm/min的拉伸速率,对10 mm×3 mm×3 mm哑铃型样条进行测试,每个样条至少测量5次,然后求取平均值。

2 结果与讨论

2.1 扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300的FTIR分析

图1为扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300的结构式及FTIR谱图。图1a中,1 725 cm^{-1} 处为C=O的伸缩振动峰^[11],1 600, 1 493, 1 435 cm^{-1} 处均为苯

环的骨架特征峰^[12],908 cm^{-1} 处为环氧基团的伸缩振动峰^[13],这与扩链剂KL-E4370上的重要基团相一致。图1b中,3 200 cm^{-1} 处为N—H的伸缩振动峰,1 666 cm^{-1} 处为C=O的伸缩振动峰,1 600, 1 574, 1 495 cm^{-1} 处均为苯环的骨架特征峰,1 413 cm^{-1} 处为C—N的伸缩振动峰^[14],720 cm^{-1} 处为 $-(\text{CH}_2)_8-$ 的伸缩振动峰^[15],这与成核剂TMC-300的结构式相一致,说明笔者所在单位已成功制备了扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300。

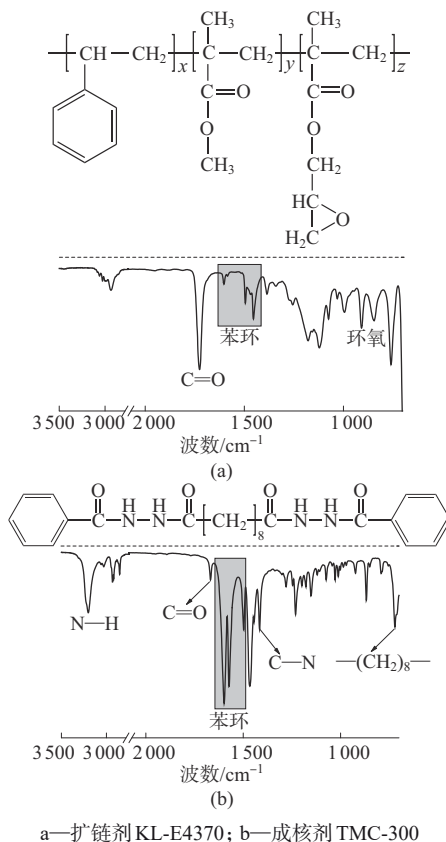


图1 扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300的结构式及FTIR谱图

2.2 PLA/PBAT共混体系的热分解行为

图2为不同PLA/PBAT共混体系在氮气氛围下的TG和DTG曲线,PLA/PBAT的TG热分解分为两个阶段,对应的DTG曲线出现两个峰,主要发生在300~500 $^{\circ}\text{C}$;且随着温度的升高,PLA/PBAT在600 $^{\circ}\text{C}$ 时几乎无残炭剩余。当加入扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300后,PLA/PBAT/KL-E和PLA/PBAT/KL-E/TMC展示出与PLA/PBAT相似的TG和DTG曲线。表2是不同PLA/PBAT共混体系在5 K/min升温速率下的热失重数据,可以看出PLA/PBAT的5%失重温度($T_{5\text{wt}\%}$)、50%失重温度($T_{50\text{wt}\%}$)和最大失重速率温度($T_{\max}$)分别为330.04,

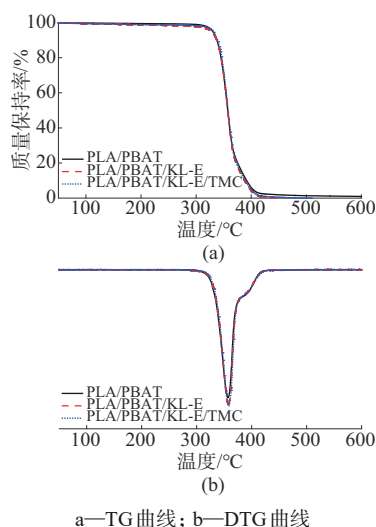


图2 不同PLA/PBAT共混体系在5 K/min升温速率下的TG和DTG曲线

355.33, 357.12 °C; 当加入扩链剂 KL-E4370 后, PLA/PBAT/KL-E 的 $T_{5wt\%}$ 略有下降, $T_{50wt\%}$ 则提高了 2.20 °C, 这是因为扩链剂 KL-E4370 的存在起到了对抗主链断裂的作用, 扩链剂 KL-E4370 中环氧官能团与 PLA 和 PBAT 的端羟基和端羧基发生开环反应, 生成 PLA-(KL-E4370)-PBAT 共聚物, 充当 PLA 和 PBAT 两相桥梁, 改善了 PLA 和 PBAT 两相的相容性, 使得 PLA/PBAT 共混体系的 $T_{50wt\%}$ 有所提高^[16]; 当加入扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 后, PLA/PBAT/KL-E/TMC 的 $T_{5wt\%}$, $T_{50wt\%}$ 和 T_{max} 较 PLA/PBAT/KL-E 略有升高。总体来看, 扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 的加入对 PLA/PBAT 共混体系的热稳定性影响不大。

表2 不同 PLA/PBAT 共混体系的热失重数据

样品代号	$T_{5wt\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{50wt\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$E/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\ln A$
PLA/PBAT	330.04	355.33	357.12	236.12	33.81
PLA/PBAT/KL-E	327.53	357.53	357.58	245.48	35.30
PLA/PBAT/KL-E/TMC	330.68	358.25	358.33	251.00	38.36

注: $T_{5wt\%}$ 为 5% 失重温度, $T_{50wt\%}$ 为 50% 失重温度, T_{max} 为最大失重速率温度, E 为活化能, A 为指前因子。

本次实验采用的是升温速率为 5, 10, 15, 20, 25 K/min 下的 T_{max} 数据, 基于 Kissinger 方法得到的 $\ln(\beta/T_{max}^2) - 1000/T_{max}$ 曲线图如图 3 所示, 根据式(1)计算出的活化能和指前因子列于表 2。由表 2 可知, 基于 Kissinger 方程计算得到的 PLA/PBAT/KL-E 和 PLA/PBAT/KL-E/TMC 的活化能和指前因子均比 PLA/PBAT 的高, PLA/PBAT 的活化能值为 236.12 kJ/mol, 当加入扩链剂 KL-E4370 后, PLA/PBAT/KL-

E 的活化能值为 245.48 kJ/mol, 比 PLA/PBAT 提高了 4.0%; 当加入扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 后, PLA/PBAT/KL-E/TMC 的活化能值为 251.00 kJ/mol, 比 PLA/PBAT 提高了 6.3%。活化能值的提高说明 PLA/PBAT 共混体系达到最大失重速率时所需的温度更高, 即所需的能量更高, 这主要是因为扩链剂 KL-E4370 与 PLA/PBAT 分子链段间的界面作用力, 限制了 PLA/PBAT 分子间的运动, PLA/PBAT 分子首先要吸收能量打破这种界面作用力的束缚才可以进行进一步的分解^[17]。

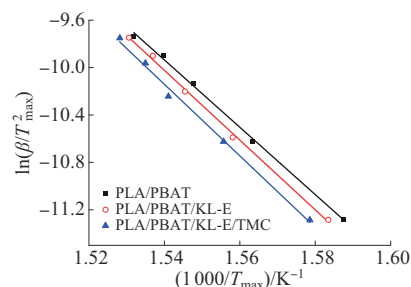


图3 基于 Kissinger 方程得到的不同 PLA/PBAT 共混体系 $\ln(\beta/T_{max}^2) - 1000/T_{max}$ 曲线图

2.3 PLA/PBAT 共混体系的断面形貌

扩链剂 KL-E4370 和成核剂 TMC-300 在 PLA/PBAT 共混体系中的分散情况如图 4 所示。图 4a 为 PLA/PBAT 的断面 SEM 照片, 当 PBAT 与 PLA 共混后, PLA/PBAT 断面中部分 PBAT 脱落分散于 PLA 基体中, 表明 PLA 和 PBAT 为部分相容, 断面具有较大的孔洞和较长的裂纹, 有明显的界面“缺陷”, 这主要是因为 PBAT 与 PLA 的界面结合力弱, 容易形成界面“缺陷”, 在受到外力作用时极易发展成破坏

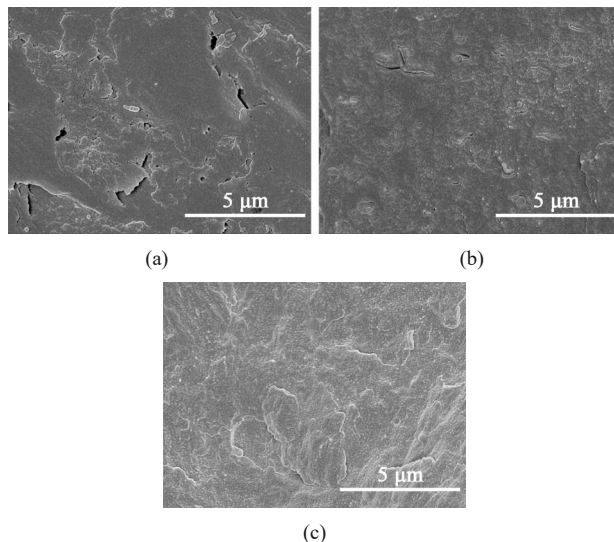


图4 不同 PLA/PBAT 共混体系的断面 SEM 照片

性裂纹,这也是造成PLA/PBAT力学性能不佳的主要原因。从图4b可知,扩链剂KL-E4370的存在增强了PBAT与PLA基体的界面作用,PBAT相的粒径尺寸变小,PBAT与PLA基体的相容性得到提高^[18]。当同时加入扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300时,PBAT与PLA基体的相容性得到进一步的改善,PLA/PBAT/KL-E/TMC的断面无明显的界面“缺陷”存在。

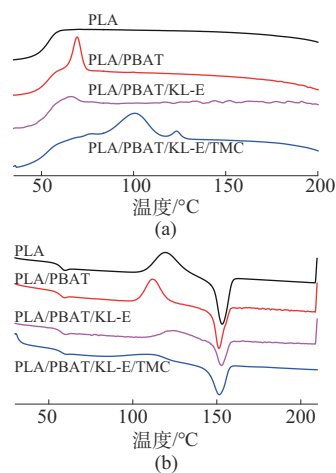
2.4 PLA/PBAT共混体系的结晶性能

图5为纯PLA及不同PLA/PBAT共混体系在升降温速率均为10 K/min下的DSC曲线图,表3为根据图5所得出的纯PLA及不同PLA/PBAT共混体系的DSC数据总结。由图5可以看出,纯PLA无明显的结晶峰,这表明PLA自身结晶速率缓慢,所需结晶时间长,在降温过程中没有发生结晶。PLA/PBAT和PLA/PBAT/KL-E出现结晶峰,且PLA/PBAT/KL-E的结晶温度(T_c)低于PLA/PBAT,冷结晶温度(T_{cc})由111.75 °C升高到124.03 °C,冷结晶峰宽也随之变宽,说明扩链剂KL-E4370的加入限制了PLA/PBAT的结晶。这主要是因为共混过程中扩链剂KL-E4370与PLA/PBAT分子之间发生反应,在一定程度上破坏了PLA/PBAT分子链的规整性,给

PLA/PBAT结晶造成阻碍,导致了结晶性能的降低^[19]。当加入成核剂TMC-300后,PLA/PBAT/KL-E/TMC出现两个结晶峰,且结晶大幅度地提前, T_c 比PLA/PBAT的 T_c 高31.5 °C,结晶度为57.37%,比PLA/PBAT的提高3倍多。这主要是因为成核剂TMC-300的加入提供了更多的成核位点,降低了结晶活化能,加速了PLA/PBAT共混体系链段间的有序性排列,扩大了PLA/PBAT共混体系的有序性区域分布,从而使得LA/PBAT/KL-E/TMC的结晶性能提高。另外,由图5b可以看出,PLA/PBAT/KL-E/TMC无明显的冷结晶峰,这也侧面证明成核剂TMC-300促进了PLA/PBAT在冷却过程中的结晶,缩短了结晶时间,结晶能力显著提高。此外,扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300的加入对PLA/PBAT共混体系的玻璃化转变温度和熔融温度无明显的影响。

2.5 PLA/PBAT共混体系的拉伸性能

图6为不同PLA/PBAT共混体系的拉伸性能。由图6看出,当添加扩链剂KL-E4370后,PLA/PBAT/KL-E的拉伸强度显著提高,从PLA/PBAT的42.7 MPa提高到47.6 MPa,这是由于扩链剂KL-E4370的键合作用使得PLA与PBAT之间的相容性增加,从图4相应的SEM照片中也可看出,加入扩链剂KL-E4370后,PLA/PBAT共混体系界面的孔洞和裂纹减少,应力传递效率提高,故拉伸性能得到改善。当同时添加扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300后,PLA/PBAT/KL-E/TMC的拉伸强度进一步提高,这是由于成核剂TMC-300的存在加速了PLA/PBAT共混体系的结晶,共混体系的规整度提高,刚性变强。此外,添加扩链剂KL-E4370后,PLA/PBAT共混体系的断裂伸长率也有明显的提高,这主要是因为生成的PLA-(KL-E4370)-PBAT共聚物充当增容剂使得PLA和PBAT两相间的界面黏



a—结晶曲线; b—二次升温曲线
图5 纯PLA及不同PLA/PBAT共混体系的DSC曲线

表3 纯PLA及不同PLA/PBAT共混体系的DSC数据

样品代号	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_{cc}/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$X_c/\%$
PLA	57.44	—	119.57	153.14	—
PLA/PBAT	56.49	69.30	111.75	151.25	14.12
PLA/PBAT/KL-E	57.58	62.60	124.03	152.85	5.21
PLA/PBAT/KL-E/TMC	57.06	100.80/ 123.30	—	151.50	57.37

注: T_g 为玻璃化转变温度, T_c 为结晶温度, T_{cc} 为冷结晶温度, T_m 为熔融温度, X_c 为结晶度。

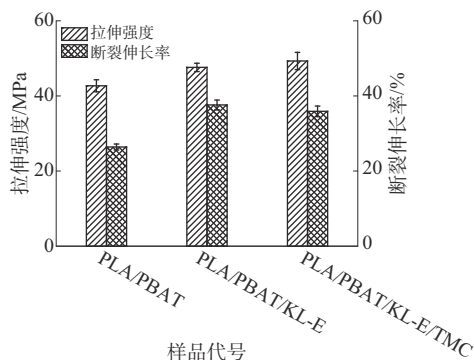


图6 不同PLA/PBAT共混体系的拉伸性能

结力增强,韧性提高。当同时添加扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300后,PLA/PBAT/KL-E/TMC的断裂伸长率有所下降,这主要是因为结晶度的提高使得PLA/PBAT/KL-E/TMC共混体系的规整度提高,韧性有所下降。

3 结论

(1)扩链剂KL-E4370中环氧官能团可与PLA和PBAT的端羟基和端羧基发生开环反应,生成PLA-(KL-E4370)-PBAT共聚物,充当PLA和PBAT两相桥梁,改善了PLA和PBAT两相的相容性。

(2)成核剂TMC-300的加入提供了更多的成核位点,降低了结晶活化能,大大地提高了PLA/PBAT共混体系的结晶性能,PLA/PBAT/KL-E/TMC的结晶温度比PLA/PBAT的结晶温度高31.5℃,PLA/PBAT/KL-E/TMC的结晶度比PLA/PBAT的结晶度高出3倍多。

(3)总体来看,扩链剂KL-E4370和成核剂TMC-300对PLA/PBAT基体的热稳定性影响不大,但能提高PLA/PBAT的 $T_{50wt\%}$ 。

(4)扩链剂KL-E4370的键合作用使得PLA与PBAT之间的相容性增加,因此PLA/PBAT/KL-E和PLA/PBAT/KL-E/TMC的拉伸性能得到提高;成核剂TMC-300的存在加速了PLA/PBAT共混体系的结晶,共混体系的规整度提高,因此PLA/PBAT/KL-E/TMC的断裂伸长率有所下降。

参考文献

- [1] Cvek M, Paul U C, Zia J, et al. Biodegradable films of PLA/PPC and curcumin as packaging materials and smart indicators of food spoilage[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 4(12): 14–23.
- [2] Rajeshkumar G, Seshadri S A, Devnani G L, et al. Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites-A comprehensive review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310(1). DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127483.
- [3] Li X L, Liu J, Lu Y S, et al. Melting centrifugally spun ultrafine poly butylene adipate-co-terephthalate (PBAT) fiber and hydrophilic modification[J]. RSC Advances, 2021, 11(43):27 019–27 026.
- [4] 潘晓娣,杨童童,覃燕杰,等. PBAT, PLA 和 PBAT/PLA 共混物的熔体流动性能研究及应用[J]. 合成技术及应用, 2022, 37(3):6–14. Pan Xiaodi, Yang Tongtong, Qin Yanjie, et al. Study on the melt flow properties and application of PBAT, PLA and PBAT/PLA[J]. Synthetic Technology & Application, 2022, 37(3):6–14.
- [5] Zhou Y K, Qiu S, Waterhouse G I N, et al. Enhancing the properties of PBAT/PLA composites with novel phosphorus-based ionic liquid compatibilizers[J]. Materials Today Communications, 2021, 27(8). DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102407.
- [6] 王冬,蒙钊,丁力. 扩链剂KL-E4370对PLA/PBAT复合材料结构与性能的影响[J]. 塑料科技, 2018, 46(5):27–32. Wang Dong, Meng Zhao, Ding Li. Influences of chain extender KL-E4370 on structure and properties of PLA/PBAT composites[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(5):27–32.
- [7] Cassia B C L R D, Montagna L S, Paula B D S A, et al. Study of the biodegradation of PLA/PBAT films after biodegradation tests in soil and the aqueous medium[J]. Biointerface Research in Applied Chemistry, 2021, 12(1):833–846.
- [8] 张涛,曹明,苗继斌,等. 成核剂与增容剂调控聚乳酸/聚丙烯复合材料的结晶与力学性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(9):2 608–2 612. Zhang Tao, Cao Ming, Miao Jibin, et al. Study on the crystallization behavior and mechanical properties of PP/PLA composites regulated by nucleating agent and compatibilizer[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(9):2 608–2 612.
- [9] Zhang H, Luo D W, Zhen W J. Preparation, crystallization and thermo-oxygen degradation kinetics of poly(lactic acid)/fulvic acid-g-poly(isoprene) grafting polymer composites[J]. Polymer bulletin, 2022, 79(5):3 155–3 174.
- [10] Beauson J, Schillani G, Van der Schueren L, et al. The effect of processing conditions and polymer crystallinity on the mechanical properties of unidirectional self-reinforced PLA composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 152. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106668.
- [11] Rakipov I T, Petrov A A, Akhmediyarov A A, et al. FTIR spectral study of intermolecular interactions of C=O groups of amides in solution[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 354. DOI:10.1016/j.molliq.2022.118838.
- [12] Kim M, Lee Z, Kim W, et al. Realtime human object segmentation using image and skeleton characteristics[J]. Journal of Broadcast Engineering, 2016, 21(5):782–791.
- [13] Annappa A R, Basavarajappa S, Shivaramu P D. Spectral characterization of morphological structure of organomodified montmorillonite clay-based epoxy nanocomposite[J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2021, 26(6):471–485.
- [14] Gao N B, Šliz M, Quan C, et al. Biomass CO₂ gasification with CaO looping for syngas production in a fixed-bed reactor[J]. Renewable Energy, 2021, 167:652–661.
- [15] Shi L, Saitoh H, Shibasaki Y. Study on thermal degradation mechanisms of comb polyacrylates containing long fluorocarbon side chains by TG/FTIR[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2015, 38(15):2 794–2 803.
- [16] 舒梦莹,翁云宣,张彩丽. 多元环氧扩链剂(ADR)对PBAT的扩链改性及其耐老化性能的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(3):7–13.