

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.10.024

扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系结构及性能

赵海鹏^{1,2}, 胡顺朋^{1,2}, 夏学莲², 张延兵²

(1. 郑州大学化工学院, 郑州 450001; 2. 河南城建学院材料与化工学院, 河南平顶山 467036)

摘要:以扩链剂为增容剂,采用双螺杆挤出机制备了聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)/聚乳酸(PLA)/扩链剂共混体系,研究了该增容剂对 PBAT/PLA 共混体系微观结构、动态流变性能、热性能和力学性能的影响。结果表明,扩链剂的环氧基团能够与 PBAT 和 PLA 发生化学键合,增加 PBAT/PLA 共混体系的界面结合力,降低 PBAT 和 PLA 两相的界面张力,使 PLA 结晶度下降,提高共混体系的拉伸强度和断裂伸长率。当扩链剂含量为 1.25 份时, PBAT/PLA 共混体系表现出最佳的力学性能,拉伸强度由未添加扩链剂时的 24.1 MPa 提高到 27.3 MPa,断裂伸长率由 184.7% 提高到 213.2%。

关键词:聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯;聚乳酸;相容性;共混

中图分类号: TQ314.263 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)10-0131-07

Structures and Properties of PBAT/PLA Composites with Chain Extender

Zhao Haipeng^{1,2}, Hu Shunpeng^{1,2}, Xia Xuelian², Zhang Yanbing²

(1. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: The chain extender SG-20 as a compatibilizer was introduced into blend of poly(butylene adipate-coterephthalate) (PBAT) and poly(lactic acid) (PLA) by melt blending through a twin-screw extruder to prepare a series of PBAT/PLA/SG-20 composites. The effect of the compatibilizer on micro-morphology, dynamic rheological properties, thermal properties and mechanical properties of PBAT/PLA blend was investigated. The results indicate that the epoxy group of SG-20 can occur chemically bonding with PBAT and PLA, which increase the interface binding force of the PBAT/PLA blend system, reducing the interfacial tension of PBAT and PLA, leading to a decrease in the crystallinity of PLA, so improving the tensile strength and elongation at break of the blend system. When the content of SG-20 reaches 1.25 phr, the PBAT/PLA/SG-20 composite, showing the best mechanical properties, individually increases its tensile strength and elongation at break from 24.1 MPa to 27.3 MPa and from 184.7% to 213.2% compared without chain extender.

Keywords: poly(adipate butylene-to-terephthalate); polylactic acid; compatibility; blending

近年来,随着全球“白色污染”的日益严重和石油资源的逐渐短缺,可生物降解材料越来越受到人们的关注^[1-3]。聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)是一种完全可生物降解的芳香族聚酯,是己二酸丁二酯(PBA)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的共聚物。PBAT 既具备 PBA 链段的柔顺性,又有 PBT 链段的耐热性和耐冲击性。目前, PBAT 多应用于吹塑薄膜,如环保垃圾袋或农用地膜等^[4-6]。聚

乳酸(PLA)是一种新型的可再生、可生物降解材料,以植物资源中提取出的淀粉为原料,废弃后能完全生物降解,具有环境友好、拉伸强度高、硬度高、加工性能优良等特点^[7]。然而, PLA 也存在韧性和热稳定性差的缺点。PBAT 具有较好的柔韧性,但其强度和模量较低; PBAT 和 PLA 共混改性通常可以提高这两种聚合物的综合性能^[8-10]。然而, PBAT 和 PLA 相容性差直接导致 PBAT/PLA 共混体系的

基金项目:平顶山市重大科技攻关项目(2020ZD05)

通信作者:赵海鹏,博士,教授,研究方向为高分子材料的改性

收稿日期:2021-08-09

引用格式:赵海鹏,胡顺朋,夏学莲,等.扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系结构及性能[J].工程塑料应用,2021,49(10):131-137.

Zhao Haipeng, Hu Shunpeng, Xia Xuelian, et al. Structures and properties of PBAT/PLA composites with chain extender[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10): 131-137.

力学性能急剧下降^[11-12]。因此需添加增容剂降低 PBAT/PLA 共混体系的界面张力,提高相界面结合力,改善共混体系的力学性能。目前,改善 PBAT 与 PLA 之间相容性的主要增容剂有:甲基丙烯酸缩水甘油酯 (GMA)^[13]、4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯 (MDI)^[14]、超支化聚合物 (HBP)^[15]、钛酸四丁酯 (TBT)、乙酰柠檬酸三丁酯 (ATBC)、过氧化苯甲酰 (BPO)^[16]、马来酸酐^[17] 和多官能环氧化物等^[18-19]。

笔者采用扩链剂来增容 PBAT/PLA 共混体系。扩链剂是由苯乙烯与 GMA 合成的共聚物,一个分子结构含有 7 个以上环氧基团,可与 PBAT 和 PLA 的末端羟基和羧基发生反应,生成 PBAT-PLA 共聚物,从而提高共混体系的相容性。主要从化学结构、微观结构,以及宏观表现出来的热力学性能、流变行为 4 个方面研究扩链剂含量对 PBAT/PLA 共混体系增容效果的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBAT: ecoflex®F Blend C1200, 德国 BASF 公司;

PLA: 2003D, 美国 Nature Works 公司;

扩链剂: SG-20, 佳易容聚合物(上海)有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电热鼓风干燥箱: GFL-230 型, 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司;

同向双螺杆挤出机: SHJ-36 型, 南京杰亚挤出装备有限公司;

微型注塑机: HAAKE MiniJet Pro 型, 赛默飞世尔(中国)有限公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Frontier FT-IR 型, 美国 Perkin Elmer 公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC8500 型, 美国 Perkin Elmer 公司;

旋转流变仪: HAAKE MARS 型, 赛默飞世尔(中国)有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SU8010 型, 日本日立高新技术公司;

伺服控制拉力试验机: AL-7000M 型, 高铁科技股份有限公司。

1.3 样品制备

先将 PBAT 和 PLA 在 60℃ 的鼓风干燥箱中干燥 36 h, 再将 PBAT、PLA、扩链剂按照表 1 配比混

合均匀, 置于双螺杆挤出机中进行熔融共混, 双螺杆挤出机进料段到机头的各温度分别为 155, 160, 165, 170, 175, 175, 175, 170, 170, 175℃, 螺杆转速为 100 r/min, 水冷切粒并干燥, 用微型注塑机 (注射温度 175℃) 获得平板流变和力学性能测试试样。

表 1 共混体系的组分质量配比

材料	样品编号						
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
PBAT	70	70	70	70	70	70	70
PLA	30	30	30	30	30	30	30
SG-20	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5

1.4 性能测试与结构表征

FTIR 分析: 取 PBAT/PLA 共混材料颗粒热压成薄膜, 采用衰减全反射 (ATR) 模式扫描, 扫描范围 650~4000 cm⁻¹, 扫描次数 32 次, 分辨率 4 cm⁻¹。

动态流变分析: 测试样品为直径 25 mm, 厚度 1 mm 的圆片, 角频率扫描, 温度 190℃, 扫描频率范围 0.1~100 rad/s, 应变为 1%。

DSC 分析: 取 PBAT/PLA 共混材料颗粒 5~8 mg, 放入铝坩埚, 从 25℃ 升温至 200℃, 保温 5 min 后, 降温至 -40℃, 再升温至 200℃, 升温、降温速率均为 10℃/min。

SEM 分析: 将样品在液氮中浸没 5 min 后淬断, 干燥后, 用 SEM 观察共混材料断面形貌, 加速电压为 1.0 kV, 放大倍率为 5000 倍。

拉伸性能按照 GB/T 1040.2-2006 测试, 拉伸速率为 20 mm/10 min。

2 结果与讨论

2.1 扩链剂及增容机理分析

扩链剂是由苯乙烯与 GMA 合成的共聚物, 可作为聚酯材料的扩链剂, 扩链剂的 FTIR 如图 1 所示。由图 1 可知, 3059 cm⁻¹ 和 3026 cm⁻¹ 处为聚苯乙烯的特征吸收峰, 2850~3100 cm⁻¹ 都有吸收峰, 说明共聚物中存在饱和及不饱和的碳链, 1750~2000 cm⁻¹ 的锯齿型吸收峰为苯环中 C—H 键弯曲振动吸收峰, 1600 cm⁻¹ 处的吸收峰为苯环骨架振动吸收峰, 757 cm⁻¹ 和 696 cm⁻¹ 为苯环单取代的特征峰, 这些吸收峰说明扩链剂链段中存在聚苯

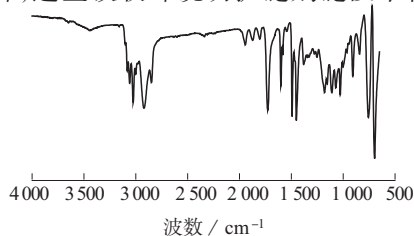


图 1 扩链剂的 FTIR 谱图

乙烯链段; 1726 cm^{-1} 处为 $\text{C}=\text{O}$ 键的振动吸收峰, 1180 cm^{-1} 处为 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键的伸缩振动峰,说明扩链剂中含有酯键, 908 cm^{-1} 和 843 cm^{-1} 处的吸收峰为环氧基团的特征峰,这些可以说明甲基丙烯酸缩水甘油酯 (GMA) 的存在。

扩链剂的一个分子结构含有 7 个以上环氧基团,环氧基团有很高的反应活性,容易与活泼氢原子(如羧基、羟基、酰胺基等)发生开环加成反应。含两个以上环氧基团的化合物与多官能团化合物发生加成反应可生成具有交联结构的化合物。扩链剂与 PBAT, PLA 的反应机理如图 2 所示, PBAT 和 PLA 的端基具有羟基和羧基,扩链剂中的环氧基团可与 PBAT, PLA 的端羟基和端羧基发生反应,形成 PBAT-g-PLA 共聚物,从而提高 PBAT 和 PLA 的相容性,改善共混体系的性能。

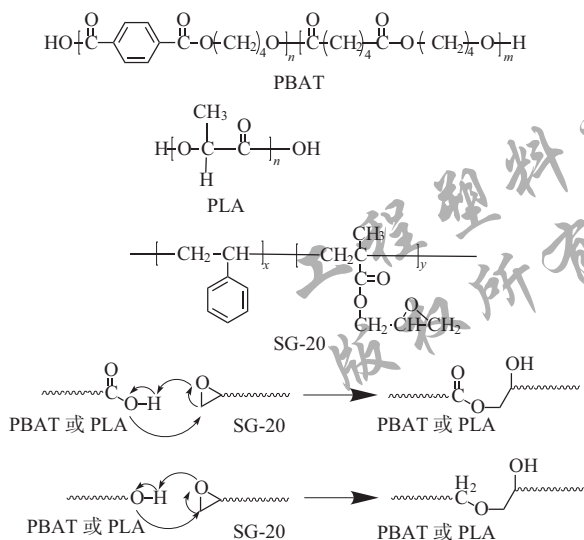
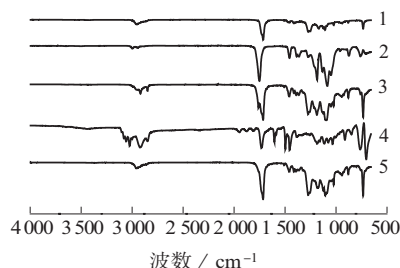


图2 扩链剂与 PBAT, PLA 反应机理

2.2 扩链剂对 PBAT/PLA 化学结构的影响

扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的 FTIR 谱图如图 3 所示,在 $1712, 1726\text{ cm}^{-1}$ 和 1749 cm^{-1} 处的尖锐吸收峰分别是由 PBAT、扩链剂和 PLA 中 $\text{C}=\text{O}$ 的羰基伸缩振动引起的。在 728 cm^{-1} 处为 PBAT 分子链中 4 个及 4 个以上亚甲基形成的吸收峰。SG-20 在 908 cm^{-1} 和 843 cm^{-1} 处的吸收峰对应着环氧基的伸缩振动,而 PBAT, PLA 及其共混体系在 908 cm^{-1} 和 843 cm^{-1} 处未出现环氧基团的吸收峰,表明扩链剂上的活性环氧基团能与 PBAT, PLA 分子链末端的羧基或羟基发生开环反应,且完全消耗。所以扩链剂在高温熔融共混过程中,可与 PBAT 和 PLA 分子链末端的羧基和羟基发生原位

反应,产生 PBAT-g-PLA 的大分子链,从而提高两者的相容性。



样品编号: 1-PBAT; 2-PLA; 3-1[#]; 4-SG-20; 5-3[#]

图3 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的 FT-IR 谱图

2.3 共混体系的流变特性分析

聚合物熔体的动态流变行为不仅表现出聚合物不可逆的黏性流动形变,而且还表现出可逆的弹性形变。储能模量 G' 和损耗模量 G'' 分别反映聚合物在熔融状态下的弹性和黏性^[20]。图 4 是 PBAT 及 PBAT/PLA 共混体系的流变曲线。由图 4a 和图 4b 可见, PBAT 和 PBAT/PLA 共混体系的 G' 和 G'' 随角频率 (ω) 增大而升高。由于在低剪切频率下,聚合物分子链有足够的时间解缠结,导致大量分子链的松弛,因此材料在低频区的 G' 和 G'' 较低。当 ω 继续增加时,分子链的松弛时间远远大于体系的变形时间,分子链的松弛跟不上外力的变化,体系表现出滞后现象,因此 G' 和 G'' 增大。PBAT 在高频区的 G' 和各频区的 G'' 大于未加扩链剂的 PBAT/PLA 共混体系的 G' 和 G'' ,这是因为 PBAT 分子链上有较多的亚甲基赋予其优异的柔韧性, PBAT 相比 PLA 具有较高的黏弹性,所以添加 PLA 导致 PBAT 在高频区的 G' 和各频区的 G'' 降低。在 PBAT/PLA 共混体系中,较低的扩链剂添加量对 PBAT/PLA 共混体系的 G' 和 G'' 几乎没有改变;继续增加扩链剂添加量, PBAT/PLA 共混体系的 G' 和 G'' 随着扩链剂添加量的增大而升高;但添加到 1.25 份扩链剂后,继续增加扩链剂添加量, PBAT/PLA 共混体系的 G' 和 G'' 几乎不变。这是因为扩链剂添加量少时对共混体系分子链的作用不明显,随着扩链剂添加量增加使共混体系分子链的交联度明显提升,但扩链剂添加量到 1.25 份后,扩链剂添加量过量,共混体系分子链的交联反应减弱。 G' 的值越大,说明共混体系缠结密度越大,内部交联度越大。结合前述红外分析结果,表明扩链剂的加入,生成了 PBAT-PLA 共聚物,增加界面处聚合物的相对分子质量,从而表现出更高的模量。

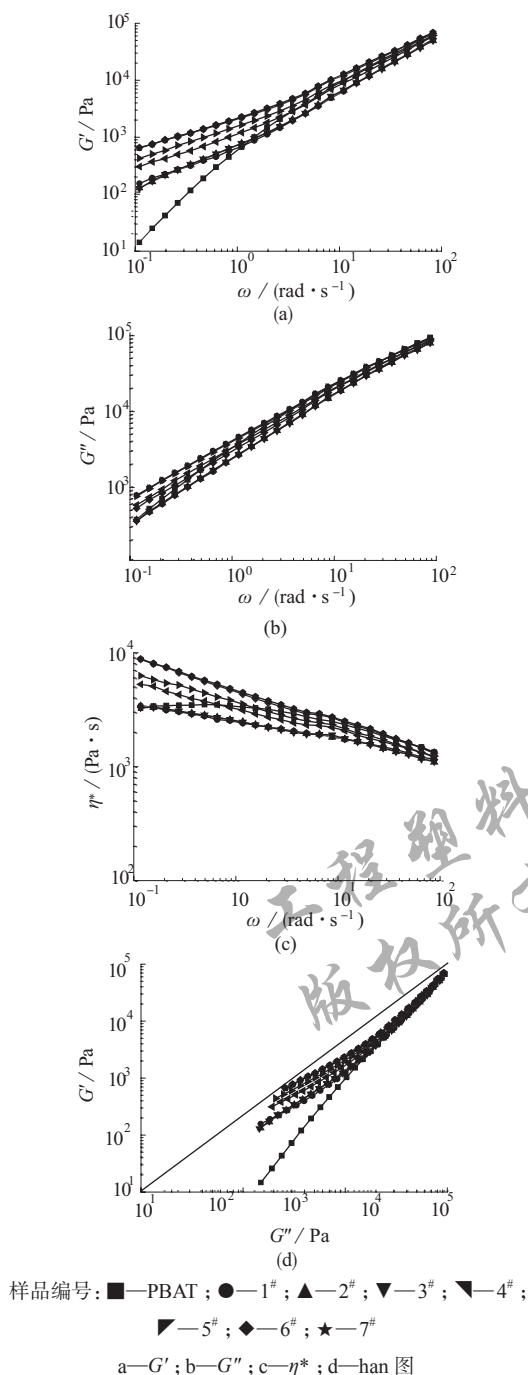


图4 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的流变曲线

复数黏度 (η^*) 是物质对动态剪切总阻抗的量度,由动态黏度 (黏性成分) 和虚数黏度 (弹性成分) 两部分构成。由图 4c 可见,在低频区,纯 PBAT 的 η^* 基本不随频率改变;在高频区,纯 PBAT 的 η^* 随着 ω 的增加表现出剪切变稀行为;PBAT/PLA 共混体系的 η^* 随着 ω 的增加表现出剪切变稀行为。纯 PBAT 的 η^* 高于未添加扩链剂 PBAT/PLA 共混体系的 η^* ,与文献报道结果一致^[21]。在 PBAT/PLA 共混体系中,0.25 份和 0.5 份扩链剂的 PBAT

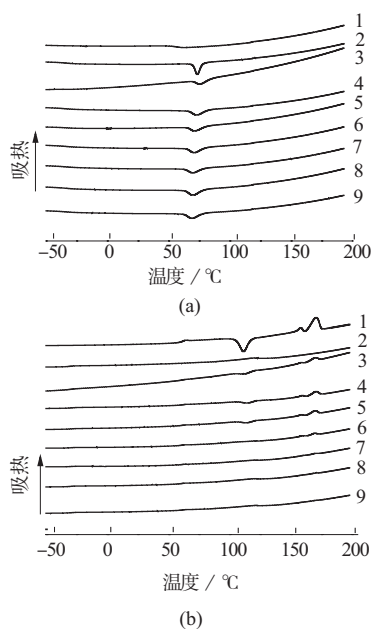
/PLA 共混体系的 η^* 基本不受影响;扩链剂量超过 0.5 份后,共混体系的 η^* 随扩链剂含量的增加而增加;但扩链剂用量超过 1.25 份后, PBAT/PLA 共混体系的 η^* 基本不受扩链剂含量影响。表明扩链剂与 PBAT, PLA 生成支化共聚物,在剪切作用下,支化共聚物的支化结构加剧了链与链之间的缠结程度,从而导致共混体的 η^* 增加。

在动态流变实验中的 han 曲线,可以评价复合材料中聚合物基体之间的界面相互作用和混容性。 G' 大于 G'' 表示共混体系的黏弹行为以弹性为主, G'' 大于 G' 表示共混体系的黏弹行为以黏性行为。由图 4d 可见,对角线为 G' 和 G'' 的等模线, PBAT 和 PBAT/PLA 共混体系的 han 曲线全部在等模线下方,说明样品的黏弹行为以黏性为主。由图中还可看到,随着扩链剂用量的增加,0.25 份和 0.5 份扩链剂加入的 han 曲线基本不变;继续增加扩链剂用量的 PBAT/PLA 共混体系的 han 曲线往等模线靠近,弹性有所增加;但超过 1.25 份扩链剂用量的 han 曲线基本不变。表明开始扩链剂的用量少,对复合体系内物理缠结不明显;然后继续增加用量导致复合体系内物理缠结明显增加,需要的能量增加;而扩链剂用量过多后复合体系内物理缠结达到极限,需要的能量不再增加。

2.4 结晶和熔融行为分析

图 5 是 PBAT 及 PBAT/PLA 共混体系的 DSC 曲线。由图 5a 可见,纯 PLA 的降温曲线没有明显的结晶峰,纯 PBAT 和 PBAT/PLA 共混体系的降温曲线在 60~75℃ 区间有明显的结晶峰,这是因为 PLA 的熔融结晶速率比较慢,在降温速率较快的过程中,PLA 分子链来不及排列形成有序结构。PBAT/PLA 共混体系的结晶峰温度随着扩链剂含量的增加而降低,结晶峰温度从 75.9℃ 降到 69.2℃,表明扩链剂与 PBAT、PLA 发生扩链反应所形成的交联结构进一步阻碍了分子链的运动。

由图 5b 可见, PBAT 的熔融吸热峰不明显。纯 PLA 的二次升温曲线有冷结晶峰和双重熔融峰。冷结晶峰的形成是因为 PLA 分子链的刚性较大,在降温结晶过程中不易充分规整排列,来不及结晶的分子链段在再次升温过程中会吸收能量形成有序结构。双重熔融峰的形成是因为 PLA 在冷结晶过程中一些晶型不完善的部分先熔融,结晶完善的部分后熔融^[22-23]。通过表 2 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的 DSC 数据和图 5b 可见, PBAT 的



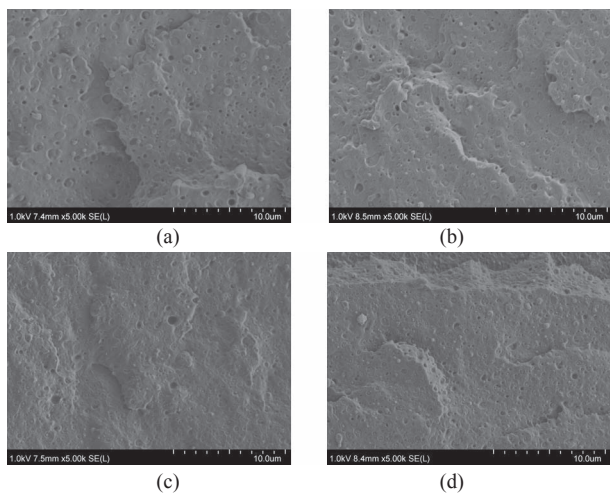
样品编号: 1—PLA; 2—PBAT; 3—1[#]; 4—2[#]; 5—3[#]; 6—4[#];
7—5[#]; 8—6[#]; 9—7[#]
a—降温曲线; b—二次升温曲线

图5 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的 DSC 曲线

表2 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的 DSC 数据

样品	$T_g / ^\circ\text{C}$		$T_c, \text{PBAT} / ^\circ\text{C}$	$T_{cc, \text{PLA}} / ^\circ\text{C}$	$T_m, \text{PBAT} / ^\circ\text{C}$	$T_{m1, \text{PLA}} / ^\circ\text{C}$	$T_{m2, \text{PLA}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta H_m, \text{PLA} / ^\circ\text{C}$	$X_c, \text{PLA} / \%$
PBAT	PBAT	PLA							
PBAT	-30.2		73.5		120.95				
PLA		63.1		111.3		157.9	170.5	28.0	29.9
1 [#]	-28.8	63.4	75.9	112.2	121.5	158.3	169.7	6.3	22.4
2 [#]	-28.9	64.4	73.1	114.6	121.8	159.1	170.4	6.8	24.1
3 [#]	-30.1	63.5	71.4	114.0	121.5	158.4	169.6	6.9	24.8
4 [#]	-30.0	63.1	71.3	114.6	121.2	159.3	169.3	2.7	9.7
5 [#]	-29.7	63.4	69.9		121.4	159.7	169.8	1.2	4.2
6 [#]	-29.6	63.2	69.3		121.2	159.1	169.0	0.4	1.4
7 [#]	-29.3	63.8	69.2		121.5	160.2	169.7	0.3	0.9

注: T_c —结晶温度, $^\circ\text{C}$; T_{cc} —冷结晶温度, $^\circ\text{C}$; T_m —熔融温度, $^\circ\text{C}$; ΔH_m —熔融热焓, J/g ; X_c —结晶度, %。



样品编号: a—1[#]; b—3[#]; c—5[#]; d—7[#]

图6 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的微观形貌 SEM 照片

加入使 PLA 的结晶度由 29.9% 降低到 22.4%, 加入大量 PBAT 会在一定程度上妨碍 PLA 链段的运动, 使其结晶度下降。加入少量 PBAT 能有效减弱 PLA 分子链之间的摩擦, 使其结晶度增加^[24-25]。在扩链剂含量小于 0.75 份时, PBAT/PLA 共混体系中 PLA 的结晶度基本不变。然而, 扩链剂用量超过 0.75 份后, PBAT/PLA 共混体系中 PLA 的结晶度由 24.8% 降低到 0.9%, 基本观察不到 PBAT/PLA 共混体系中 PLA 的冷结晶峰和双重熔融峰, 是因为扩链剂的分子链含有多个环氧基团, 加入量较多时会产生支化聚合物, 使共混体系链段的活动性降低, 分子排列成高度有序的晶格变难, 从而使得冷结晶峰和双重熔融峰逐渐消失, 结晶度下降。

2.5 扩链剂对 PBAT/PLA 共混体系微观形貌的影响

选取典型的 PBAT/PLA 共混体系的微观形貌如图 6 所示, 未加扩链剂之前, PBAT/PLA 共混体系微观断面有很多的孔洞和突起的颗粒, 这说明

PBAT 和 PLA 的相容性不好, 共混体系在外力作用下, 分散相颗粒与基体界面粘附力差, 导致分散相部分从基体中脱落。当扩链剂含量达到 0.5 份和 1 份时, PBAT/PLA 共混体系两相界面变得模糊, 孔洞数量与突起的颗粒数量明显减少。当扩链剂含量达到 1.5 份时, 共混体系脱粘下的孔洞和突起的颗粒尺寸显著变小, 两相界面不清晰。表明扩链剂能够有效降低共混体系的界面张力, 增加界面粘结力, 使共混体系的相容性提高。

2.6 共混体系的拉伸性能

图 7 为扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的拉伸强度和断裂伸长率。由图 7 可以看出, 随着扩链剂含量的增加, PBAT/PLA 共混体系的拉伸强度

先增加后基本不变, PBAT/PLA 共混体系的断裂伸长率呈先增加后减小的趋势。当扩链剂含量为 1.25 份时, PBAT/PLA 共混体系表现出最佳的拉伸性能, 拉伸强度由未添加扩链剂时的 24.1 MPa 提高到 27.3 MPa, 断裂伸长率由 184.7% 提高到 213.2%。这说明在加工过程中, 扩链剂在 PBAT 和 PLA 的共混体系中起到了增容效果, 降低了 PBAT 和 PLA 两相界面的界面张力和增加了相界面粘结力, 从而使 PBAT/PLA 共混体系的拉伸性能得到提高。

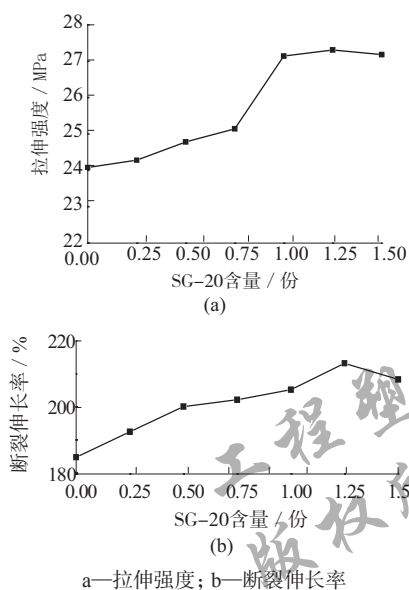


图 7 扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系的拉伸性能

3 结论

采用含有多个环氧基团的扩链剂 SG-20 作为增容剂, 制备了综合性能良好的 PBAT/PLA 共混体系。从化学结构、分子链、聚集态结构、宏观结构和力学性能 5 个方面, 证实了扩链剂对 PBAT/PLA 共混体系具有较好的增容作用。

(1) 通过 FTIR 谱图在扩链剂增容 PBAT/PLA 共混体系中检测到环氧基团的消失, 环氧基团可能与 PBAT, PLA 的端羟基和端羧基发生反应, 形成 PBAT-g-PLA 共聚物。

(2) 扩链剂添加量在适当范围时, 随着扩链剂含量的增加, PBAT/PLA 共混体系的储能模量、损耗模量、复数黏度、弹性逐渐升高, 共混体系缠结密度增大, 内部交联度增加, 生成了 PBAT-PLA 接枝、交联共聚物。

(3) 随着扩链剂含量的增加, PBAT/PLA 共混体系的结晶温度、结晶度降低, 冷结晶峰消失, 结

晶形成过程中分子链段运动受到阻碍, 扩链剂与 PBAT, PLA 发生扩链反应形成了 PBAT-PLA 的支化、交联结构。

(4) 适量添加扩链剂后, PBAT/PLA 共混体系从两相界面轮廓清晰转变为相界面模糊, 断面上孔洞、突起颗粒数量明显减少。扩链剂有效地降低了共混体系的界面张力, 增加界面粘结力。

(5) 适量扩链剂的添加, 可增加 PBAT/PLA 复合材料的拉伸性能。当扩链剂含量为 1.25 份时, 拉伸强度从 24.1 MPa 提高到 27.3 MPa, 断裂伸长率由 184.7% 提高到 213.2%。

参考文献

- [1] 尚晓煜, 刘晓南, 谢锦辉, 等. PLA/PBAT 复合材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 157-164.
Shang Xiaoyu, Liu Xiaonan, Xie Jinhui, et al. Advance in research of polylactic acid/poly (butylene adipate-co-terephthalate) composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 157-164.
- [2] 孙飞. 生物降解高分子材料的研究和发展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(2): 124-126.
Sun Fei. Research and development of biodegradable polymer materials[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2021, 41(2): 124-126.
- [3] Mazurchevici A D, Popa R I, Carausu C, et al. Basic mechanical analysis of biodegradable materials[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 968(1). doi:10.1088/1757-899X-968/1/012010.
- [4] 刘振涛, 严伟, 王奎, 等. PBAT/磷石膏复合薄膜的制备与性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(1): 25-29.
Liu Zhentao, Yan Wei, Wang Kui, et al. Preparation and properties of PBAT/PG composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1): 25-29.
- [5] Zhang Jie, Cao Chenglin, Zheng Shaoming, et al. Poly (butylene adipate-co-terephthalate) / magnesium oxide / silver ternary composite biofilms for food packaging application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100487.
- [6] 骆双灵. 聚己二酸 / 对苯二甲酸丁二酯纳米复合食品包装薄膜的研究及其在冷鲜肉保鲜中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Luo Shuangling. Study on poly(butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposite food packaging films and its application of cold fresh meat preservation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [7] Nampoothiri K M, Nair N R, John R P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(22): 8493-8501.
- [8] Chen Wenwen, Qi Chenze, Li Yao, et al. The degradation investigation of biodegradable PLA/PBAT blend: Thermal stability, mechanical properties and PALS analysis[J]. Radiation Physics and

- Chemistry, 2021, 180. doi:10.1016/j.radphyschem.2020.109239.
- [9] Arporn T, Yupaporn R, Kasama J. Preparation and characterization of poly(lactic acid) / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and their composite[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2013, 52(13):1 362–1 367.
- [10] Jiang Long, Wolcott M P, Zhang Jinwen. Study of biodegradable polylactide / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(1):199–207.
- [11] Deng Yixin, Yu Changyi, Wongwattana P, et al. Optimising ductility of poly(lactic acid) / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends through co-continuous phase morphology[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(9):3 802–3 816.
- [12] Sritham E, Phakaimat S, Chaishome J. Tensile properties of PLA / PBAT blends and PLA fibre-reinforced PBAT composite[J]. MATEC Web of conferences, 2018, 192:03014. doi:10.1051/mateconf/201819203014.
- [13] Zhang Naiwen, Wang Qinfeng, Ren Jie, et al. Preparation and properties of biodegradable poly(lactic acid) / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(1):250–256.
- [14] Pan Hongwei, Li Zonglin, 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):4 610–4 623.
- [15] Jin Yajuan, Shuang Men, Weng Yunxuan. An investigation of the impact of an amino-ended hyperbranched polymer as a new type of modifier on the compatibility of PLA / PBAT blends[J]. Journal of Polymer Engineering, 2018, 38(3):223–229.
- [16] 李盖禹, 许国志, 季君晖, 等. PLA / PBAT 共混体系相容性研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(4):51–56.
- Li Gaiyu, Xu Guozhi, Ji Junhui, et al. Study on compatibility of poly(lactic acid) / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends[J]. China Plastics, 2017, 31(4):51–56.
- [17] Mohapatra A K, Mohanty S, Nayak S K. Study of thermo-mechanical and morphological behaviour of biodegradable PLA / PBAT / layered silicate blend nanocomposites[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2014, 22(3):398–408.
- [18] Li Xin, Ai Xue, Pan Hongwei, et al. The morphological, mechanical, rheological, and thermal properties of PLA / PBAT blown films with chain extender[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(6):1 706–1 717.
- [19] Al-Ittry R, Lamnawar K, Maazouz A. Reactive extrusion of PLA, PBAT with a multi-functional epoxide: Physico-chemical and rheological properties[J]. European Polymer Journal, 2014, 58:90–102.
- [20] 华幼卿, 金日光. 高分子物理 [M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- Hua Youqing, Jin Riguang. Polymer Physics [M]. 4th. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [21] Su Shen, Duhme M, Kopitzky R. Uncompatibilized PBAT / PLA blends: Manufacturability, miscibility and properties[J]. Materials, 2020, 13(24). doi:10.3390/ma13214897.
- [22] Notta-Cuxier D, Odent J, Delille R, et al. Tailoring polylactide (PLA) properties for automotive applications: Effect of addition of designed additives on main mechanical properties[J]. Polymer Testing, 2014, 36:1–9.
- [23] Choi K, Lim S W, Choi M C, et al. Thermal and mechanical properties of poly(lactic acid) modified by poly (ethylene glycol) acrylate through reactive blending[J]. Polymer Bulletin, 2014, 71(12):3 305–3 321.
- [24] 王国振. PBAT 增韧 PLA 可降解共混体系的制备及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Wang Guozhen. Study of preparation and properties of degradable blend of PLA / PBAT [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [25] 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 Technology, 2020.