

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.021

扩链剂增容 PLA/PBAT 共混物流变性能

漆娟, 罗钟琳, 王标兵

(常州大学材料科学与工程学院, 江苏常州 213164)

摘要: 通过熔融共混法制备了 Joncryl ADR 4370F 扩链剂增容聚乳酸/聚对苯二甲酸/己二酸丁二酯 (PLA/PBAT) 共混物, 采用旋转流变仪分别研究了扩链剂和 PBAT 含量对 PLA/PBAT 共混物动态流变行为的影响。通过动态应变扫描确定了 PLA/PBAT 共混物的线性黏弹区, 应变选取 1%; PLA/PBAT 共混物的储能模量和损耗模量随着角频率的增加而增大, 但复数黏度却降低, 共混物熔体呈现剪切变稀行为, 是典型的假塑性流体流动特征; 随着扩链剂和 PBAT 含量的增加, 共混物的储能模量、损耗模量和复数黏度增大; Han 曲线分析表明, 扩链剂的加入改善了共混物的相容性; 动态时间扫描表明, 时间对纯 PLA 和 PBAT 的储能模量基本没有影响, PLA/PBAT 共混物的储能模量随着时间的延长而降低, 扩链剂和 PBAT 含量不同, 使得时间对共混物储能模量的影响不同。

关键词: 聚乳酸; 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯; 扩链剂; 动态流变

中图分类号: TB302.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)02-0123-06

Rheological Properties of PLA/PBAT Blends Compatibilized by Chain Extender

Qi Juan, Luo Zhonglin, Wang Biaobing

(School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The polylactic acid/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PLA/PBAT) blends compatibilized by the chain extender of Joncryl ADR 4370F were prepared by melt blending. The effects of the chain extender and PBAT content on the dynamic rheological behaviors of the blends were investigated by rotational rheometer. The linear viscoelastic region of PLA/PBAT blends were determined by dynamic strain scanning, and the strain was selected as 1%. The storage modulus and loss modulus of the blends were increased whilst the complex viscosity is decreased with the increasing angular frequency, the blend melts exhibit shear thinning behavior, which is a typical false plastic fluid flow characteristic. The storage modulus, loss modulus and complex viscosity of the blends are increased with the increase of the chain extender and PBAT content. The Han curves demonstrate that the compatibility of the blends is improved by the addition of the chain extender. And dynamic time scan shows that the time almost has no effect on the storage modulus of pure PLA and PBAT while the storage modulus of the PLA/PBAT blends decrease with time. Due to the difference in the content of the chain extender and PBAT, the time has different effect on the storage modulus of the blends.

Keywords: polylactic acid; poly(butylene adipate-co-terephthalate); chain extender; dynamic rheological

高分子废弃材料造成了严重的“白色污染”^[1]。目前, 废旧塑料的常用处理方法主要有填埋和焚烧两种方法^[2], 前一种方法会对土壤和地下资源造成危害, 而后一种方法则会污染空气, 因此, 可生物降解材料的发展已成为研究人员关注的热点^[3], 目前可生物降解材料已在生物医药、食品包装等领域得到广泛应用^[4-5]。

聚乳酸 (PLA) 是一种友好型材料, 有较好的可

生物降解性, 但其脆性及低延展性等缺点限制了其在工程塑料方面的开发与利用^[6], 对于 PLA 改性, 共混改性相比于共聚改性更加经济、有效, 例如, 与可生物降解聚合物聚对苯二甲酸/己二酸丁二酯 (PBAT) 共混^[7]。PBAT 是一种可生物降解弹性体, 具备良好的韧性和延展性等优点, 被认为是增韧 PLA 的最佳选择^[8]。然而 PBAT 与 PLA 分子链段结构存在巨大差异^[9], 导致两者之间的相容性较差,

通信作者: 王标兵, 教授, 主要从事高性能和功能化高分子材料的研究 E-mail: biaobing@cczu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-24

引用格式: 漆娟, 罗钟琳, 王标兵. 扩链剂增容 PLA/PBAT 共混物流变性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 123-128, 135.

Qi Juan, Luo Zhonglin, Wang Biaobing. Rheological properties of PLA/PBAT blends compatibilized by chain extender[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 123-128, 135.

无法通过简单的物理共混来提高 PLA/PBAT 共混物的韧性。因此需通过增容的方法提高 PLA 与 PBAT 两者之间的相容性,以实现 PLA/PBAT 共混物的高韧化^[10]。

Joncryn ADR 4370F 是一种含有多元含氧基团的扩链增容剂,可用于 PLA/PBAT 体系的熔融共混^[11],改善 PLA 与 PBAT 两者的粘结力,从而达到增容的效果。近年来,对多元含氧官能团扩链剂增容 PLA/PBAT 共混物的研究成为热点,一些相关文献^[12-14]通过加入扩链剂增强 PLA 和 PBAT 之间的界面粘结力,从而提高两者之间的相容性,但主要着重于研究增强共混物的机械、结晶等性能,而对于共混物的流变性能只是进行简单阐述。由于材料的使用性能最终是由共混物的相结构和粘合性来决定,且材料的流变行为决定材料的熔体强度,因此,对 PLA/PBAT 共混物的流变行为进行详细研究至关重要。笔者分别研究了 Joncryn ADR 4370F 扩链剂和 PBAT 用量对 PLA/PBAT 共混物动态流变行为的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA: 2003D, 工业级, 美国 Nature Work 公司;

PBAT: Ecoflex-F-Blend-C1200, 德国巴斯夫公司;

扩链剂: Joncryn ADR 4370F, 德国巴斯夫公司。

1.2 主要设备与仪器

密炼机: US-70C 型, 常州苏研科技有限公司;

平板硫化机: XLB-D 型, 常州市第一橡塑设备有限公司;

旋转流变仪: Physica MCR301 型, 奥地利 Anton Paar 公司。

1.3 PLA/PBAT 共混物样品的制备

不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的配方列于表 1, 扩链剂含量不变时, 不同 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物配方列于表 2。

将 PLA 和 PBAT 在 80℃ 真空干燥箱中干燥 12 h, 按照表 1 和表 2 配方, 分别对 PLA/PBAT 共混物、纯 PLA 和纯 PBAT 进行称量后于密炼机上进行熔融共混 3~6 min, 密炼温度为 180℃, 转速为 60 r/min。将每组密炼的粒料于 80℃ 真空干燥箱中干燥 12 h 后, 采用平板硫化机进行压板, 选取约 25 g 块状物放入模具中, 并将其放入平板硫化机的两层加热板之间, 在 180℃ 下预热 5 min, 当块

状物全部熔融后, 加压至 6 MPa, 保压 3~5 min, 然后进行上下排气 4~10 次, 在压力 5 MPa 下冷却 2 min, 得到厚度约为 1.0 mm 的片材, 制备直径为 25 mm 的圆片状样品。

表 1 不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的配方 份

材料	试样编号				
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
PLA	70	70	70	70	70
PBAT	30	30	30	30	30
扩链剂	0	0.15	0.35	0.55	0.75

表 2 扩链剂含量不变时不同 PBAT 含量的

PLA/PBAT 共混物配方 份				
材料	试样编号			
	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
PLA	90	80	70	60
PBAT	10	20	30	40
扩链剂	0.55	0.55	0.55	0.55

1.4 性能测试

在样品与旋转流变仪底盘间距为 1 mm、测试温度为 190℃ 下, 用旋转流变仪测试纯 PLA、纯 PBAT 和 PLA/PBAT 共混物的流变性能。

(1) 动态应变扫描: 平行板模式, 应变为 0.1%~240%, 角频率为 5 rad/s, 测试 PLA/PBAT 共混物的储能模量和损耗模量, 并对其线性黏弹区进行表征。

(2) 动态频率扫描: 角频率为 0.1~110 rad/s, 平行板模式, 在 N₂ 保护下选取应变为 1%, 确定测试在线性黏弹区进行, 分别对 PLA/PBAT 共混物的储能模量、损耗模量、复数黏度与角频率的关系进行测试, 并测试其 Han 曲线。

(3) 动态时间扫描: 平行板模式, 对样品施加长时间的振幅, 设定角频率为 5 rad/s, 应变为 100%, 测试时间为 900 s, 测试纯 PLA、纯 PBAT 和 PLA/PBAT 共混物的储能模量与时间的关系。

2 结果与讨论

2.1 动态应变扫描

不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的动态应变扫描曲线如图 1 所示。

通过动态应变扫描可以确定材料的线性黏弹区, 进而表征材料的线性黏弹行为^[15]。由图 1a 可以看出, 当应变低于 1% 时, 不含扩链剂的 PLA/PBAT 共混物的储能模量基本保持不变, 呈现线性黏弹行为; 当应变大于 1% 时, 其储能模量逐渐降低。随着扩链剂含量的增加, PLA/PBAT 共混物储能模量的线性黏弹区变宽, 在应变为 1%~50% 范围内呈现线性黏弹行为; 当应变大于 50% 时, 随着

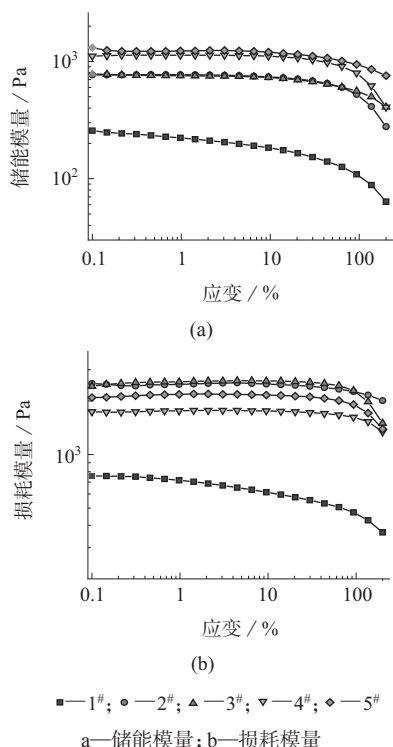


图1 不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的应变扫描曲线

应变的增加, PLA/PBAT 共混物的储能模量逐渐降低,表明扩链剂的加入对共混物的线性黏弹区有很大影响。由图 1b 可以看出,当应变低于 1% 时,不含扩链剂的 PLA/PBAT 共混物的损耗模量基本保持不变,呈现线性黏弹性行为;当应变大于 1% 时,随着应变的增加,其损耗模量逐渐降低。与储能模量线性黏弹区的变化类似,随着扩链剂含量的增加, PLA/PBAT 共混物损耗模量的线性黏弹区变宽,在整个应变范围内损耗模量的线性黏弹区比储能模量的线性黏弹区更宽。PLA/PBAT 共混物的损耗模量在应变为 0.1%~80% 的范围内基本保持不变;当应变大于 80% 时,共混物的损耗模量随着应变的增加逐渐降低,且在应变大于 80% 时,共混物损耗模量的下降幅度没有储能模量下降明显。

当扩链剂含量保持不变时,不同 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物的动态应变扫描曲线如图 2 所示。

由图 2a 可知,当 PBAT 含量较低,分别为 10 份和 20 份时, PLA/PBAT 共混物在应变低于 1% 时,其储能模量基本保持不变,呈现线性黏弹行为;当应变大于 1% 时,其储能模量开始逐渐下降。当 PBAT 含量分别增加到 30 份和 40 份时, PLA/PBAT 共混物储能模量的线性黏弹区变宽,且在应变为 0.1%~40% 的范围内呈线性黏弹行为;当应变大于 40%

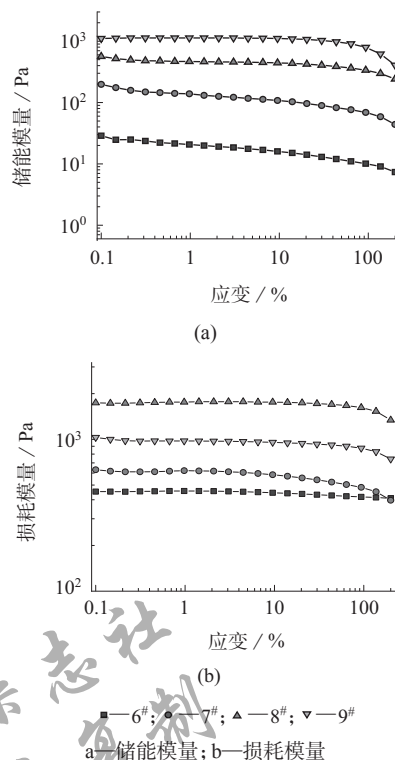


图2 扩链剂含量不变时不同 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物的应变扫描曲线

时,共混物的储能模量逐渐下降,表明 PBAT 含量的变化对共混物的线性黏弹区有很大的影响;由图 2b 可知,当 PBAT 含量为 10 份时, PLA/PBAT 共混物的损耗模量在整个应变范围内基本保持不变,呈现线性黏弹行为;当 PBAT 含量增至 20 份时,共混物损耗模量的线性黏弹区相比于储能模量的线性黏弹区变宽,在应变为 0.1%~10% 时呈现线性黏弹行为。当 PBAT 含量为 30 份和 40 份时,共混物损耗模量的线性黏弹区更宽,与储能模量线性黏弹区的变化类似,均在应变为 0.1%~40% 的范围内呈线性黏弹行为。随着应变的增加, PLA/PBAT 共混物损耗模量的变化没有储能模量的变化显著,在很宽的应变范围内,共混物的损耗模量都呈线性黏弹行为。

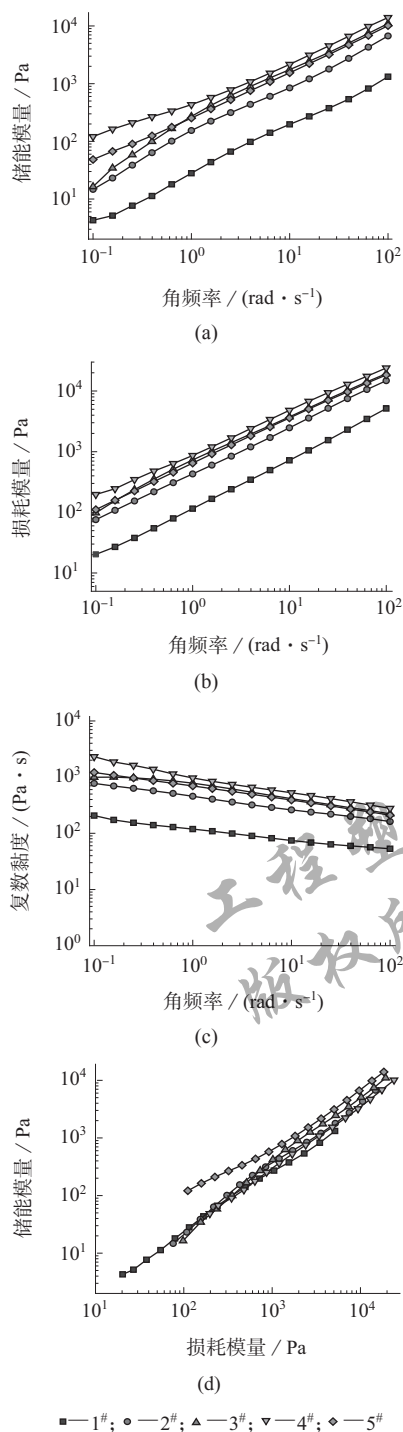
根据图 1 和图 2 的动态应变扫描结果,为确保每个样品均在线性黏弹区内进行测量,在后续测试时应变均设定为 1%。

2.2 动态频率扫描

(1) 扩链剂含量对 PLA/PBAT 共混物流变行为的影响。

不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的动态频率扫描曲线如图 3 所示。

从图 3a 和图 3b 可看出,随着角频率的增加, PLA/PBAT 共混物的储能模量和损耗模量逐渐增



a—储能模量; b—损耗模量; c—复数黏度; d—Han 曲线

图3 不同扩链剂含量的 PLA/PBAT 共混物的动态频率扫描曲线。经扩链剂增容的 PLA/PBAT 共混物的储能模量和损耗模量明显高于未添加扩链剂的 PLA/PBAT 共混物,表明扩链剂的加入促进了 PLA 和 PBAT 之间形成嵌段共聚物,改善了两者的界面粘结力,提高了 PLA 和 PBAT 分子链之间的缠结能力,使分子链间滑移阻力增大,需要克服分子间更

大的阻力来进行相对移动,更多的能量被损耗^[14],因而使储能模量和损耗模量增大。

由图 3c 可知, PLA/PBAT 共混物的复数黏度随着角频率的增加而减小,共混物被施加的剪切作用力增大,使分子链间发生解缠结,导致 PLA/PBAT 共混物熔体的复数黏度降低。扩链剂的增容作用对共混物熔体的复数黏度影响较为明显,在相同的角频率下,随着扩链剂含量的增加,共混物熔体的扩链增黏效果增强,但当扩链剂含量增至 0.75 份时,共混物熔体的复数黏度会稍微下降。这是由于扩链剂过量使得 PLA 和 PBAT 之间过度交联,分子链间的解缠结变强,导致复数黏度下降。总体来看,含扩链剂的共混物熔体的复数黏度高于不含扩链剂共混物熔体的复数黏度。随着角频率的增加,所有共混物的复数黏度会降低,共混物呈现出剪切变稀行为,是典型的假塑性流体流动特征^[16]。

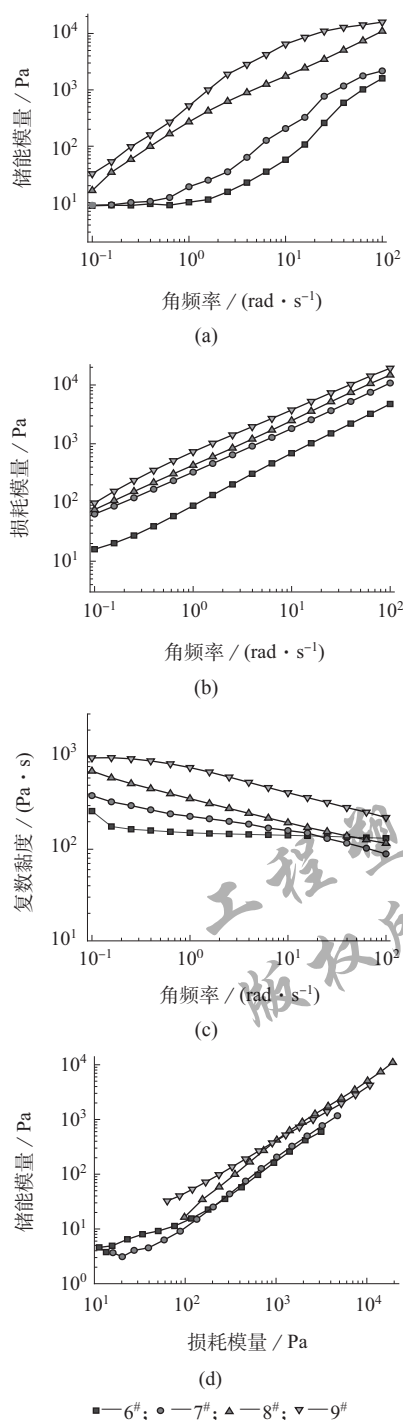
由图 3d 可知,不含扩链剂的 PLA/PBAT 共混物的 Han 曲线发生偏离,当扩链剂含量为 0.15 ~ 0.55 份时,共混物的 Han 曲线呈线性,未出现明显的相分离现象,说明扩链剂可以改善 PLA 和 PBAT 之间的相容性;当扩链剂含量为 0.75 份时,共混物的 Han 曲线在高频区基本呈线性,但在低频区则出现明显的偏离并出现末端区效应,表明扩链剂含量过高会使共混体系发生轻微的相分离。

(2) PBAT 含量对 PLA/PBAT 共混物动态频率扫描曲线的影响。

不同 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物的动态频率扫描曲线如图 4 所示。

由图 4a 可知, PLA/PBAT 共混物的储能模量随角频率和 PBAT 含量的增加,共混物的储能模量均增大,说明共混物的弹性增强。这主要是由于在 PLA/PBAT 共混物熔体中形成了缠结结构^[17],使得储能模量增大。由图 4b 可知,随着角频率的增加,共混物的损耗模量增大。这是因为角频率的增大缩短了外力作用于共混物分子链上的时间,增大了共混物分子链之间的摩擦消耗,所以损耗模量增大。在相同角频率条件下,随着 PBAT 含量的增加,共混物的损耗模量增大。这是因为 PBAT 含量的增加使共混物的分子链柔顺性增强,其弹性增强,增强了分子链之间的缠结度,致使分子链间摩擦消耗增大,导致其损耗模量增大。

由图 4c 可知,含 10 份 PBAT 的 PLA/PBAT 共混物的复数黏度基本不随角频率变化,显示出牛



a—储能模量; b—损耗模量; c—复数黏度; d—Han 曲线

图 4 不同 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物的动态频率扫描曲线。当 PBAT 含量为 20~40 份时, PLA/PBAT 共混物的复数黏度随着角频率的增加而降低, 显示出非牛顿流体特征, 表现出剪切变稀现象, 呈典型的假塑性流体特征。这是因为 PLA/PBAT 共混物中的分子链被破坏的速度大于缠结速度, 从而使共混物的复数黏度降低。在角频率为 $0.1 \sim 30 \text{ rad/s}$ 范围内, PLA/PBAT 共混物的复数黏度

随着 PBAT 含量的增加而逐渐增大。这是由于扩链剂可与共混物中的反应性基团发生特异性相互作用, 从而显著增加其分子量^[18]; 当角频率为 $30 \sim 110 \text{ rad/s}$ 时, PLA/PBAT 共混物的复数黏度随 PBAT 含量的增大呈先减小后增大的趋势。这是因为含 10 份 PBAT 的共混物为牛顿流体, 共混物的流动体系的结构基本不变, 其复数黏度在高频下基本不变; 当 PBAT 含量为 20 份时, 共混物转变为非牛顿流体, 共混物的流动体系的结构在剪切应力作用下发生改变, 因此其复数黏度低于含 10 份 PBAT 的共混物的复数黏度; 当 PBAT 含量从 20 份增至 40 份时, 共混物的复数黏度逐渐增大。这是因为 PBAT 含量的增加可加强共混物分子链之间的缠结程度, 从而使复数黏度增大。

由图 4d 可知, 含 10 份和 20 份 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物的 Han 曲线在低频区出现明显的偏离, 表明在低 PBAT 含量下 PLA/PBAT 的相容性较差; 当 PBAT 含量为 30 份和 40 份时, PLA/PBAT 共混物的 Han 曲线在测试频率范围内呈现良好的线性, 说明 PBAT 含量的升高使共混物分子链之间的缠结能力提高, 增强了共混物体系中物理缔合程度, 使共混物分子间的界面粘结性得到提高, 减少了分子链的运动, 在一定程度上提高了共混物之间的相容性。

2.3 动态时间扫描

不同扩链剂和 PBAT 含量的 PLA/PBAT 共混物动态时间扫描曲线如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知, 随着时间的延长, 纯 PLA 和纯 PBAT 储能模量的变化很小, 说明时间变化对纯 PLA 和纯 PBAT 的储能模量几乎没有影响。与不含扩链剂的 PLA/PBAT 共混物相比, 扩链剂的添加使 PLA/PBAT 共混物的储能模量增大, 并随着时间的延长, 共混物的储能模量逐渐下降。这是由于扩链剂对 PLA/PBAT 共混物的扩链增容作用, 加强了分子链段的缠结, 增加了共混物对剪切力的敏感性。当扩链剂含量为 0.15 份和 0.35 份时, 共混物的储能模量随着时间的延长而下降, 且在时间为 $0 \sim 400 \text{ s}$ 时, 共混物的储能模量下降趋势明显; 当扩链剂含量为 0.55 份和 0.75 份时, 共混物的储能模量随着时间的延长而下降, 且在时间为 $0 \sim 400 \text{ s}$ 时, 储能模量下降幅度比低扩链剂含量共混物小, 说明扩链剂含量不同, 时间对共混物储能模量的影响不同。

由图 6 可知, PBAT 含量对 PLA/PBAT 共混

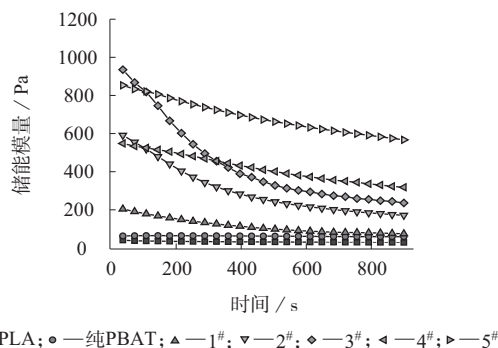


图5 不同扩链剂含量的PLA/PBAT共混物动态时间扫描曲线

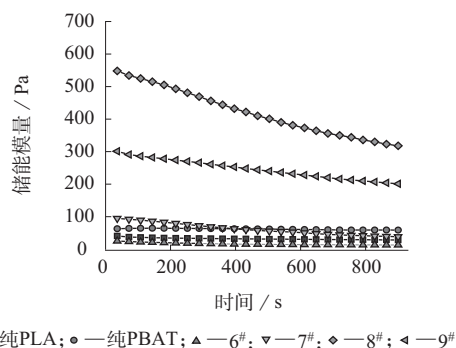


图6 不同PBAT含量的PLA/PBAT共混物动态时间扫描曲线

物储能模量的影响较大。当PBAT含量为10份和20份时,共混物的储能模量基本不随时间变化;当PBAT含量为30份和40份时,随着时间的延长,共混物的储能模量明显下降,且含30份PBAT的共混物在0~400 s内的下降幅度比含40份PBAT的共混物的下降幅度明显,说明PBAT含量不同,时间对共混物储能模量的影响不同。

3 结论

分别研究了Joncryl ADR 4370F扩链剂和PBAT用量对PLA/PBAT共混物的动态流变行为,得出以下结论:

(1) 通过动态应变扫描确定了PLA/PBAT共混物的线性黏弹区,选取应变为1%。

(2) 动态频率扫描表明,随着角频率的增加,PLA/PBAT共混物的储能模量和损耗模量增大,但复数黏度下降,共混物呈现剪切变稀行为,是典型的假塑性流体流动特征;随着扩链剂和PBAT含量的增加,PLA/PBAT共混物的储能模量、损耗模量和复数黏度增大;Han曲线结果表明,扩链剂的加入改善了PLA和PBAT的相容性。

(3) 动态时间扫描表明,纯PLA和纯PBAT的储能模量几乎不随时间的变化而变化,说明时间对纯PLA和纯PBAT的储能模量基本无影响。而PLA/PBAT共混物的储能模量随时间的延长而降

低,扩链剂和PBAT含量不同,时间对共混物储能模量的影响不同。

参考文献

- [1] 高康,黄倩.生物降解包装材料研究现状[J].绿色包装,2019(2):35-40.
Gao Kang, Huang Qian. Research status of biodegradable packaging materials[J]. Green Packaging, 2019(2):50-54.
- [2] 杨杰,王克俭.废旧塑料片材回收利用技术[J].塑料包装,2020,30(3):9-13.
Yang Jie, Wang Kejian. Recycling technology of waste plastic sheets[J]. Plastics Packaging, 2020, 30(3):9-13.
- [3] Albuquerque P B S, Malafaia C B. Perspectives on the production, structural characteristics and potential applications of bioplastics derived from polyhydroxyalkanoates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 107:615-625.
- [4] 颜颖达,赵珊,阳范文,等. PLA/PBAT共混体系的制备与性能[J].工程塑料应用,2019,47(11):36-41,46.
Yan Yingda, Zhao Shan, Yang Fanwen, et al. Preparation and properties of PLA/PBAT blends[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):36-41, 46.
- [5] Wang Longfeng, Rhim J W, Hong Seokin, et al. Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68(2):454-461.
- [6] 葛正浩,乔宇杰,岳奇.聚乳酸改性研究进展[J].工程塑料应用,2020,48(4):144-149.
Ge Zhenghao, Qiao Yujie, Yue Qi. Research progress on modification of polylactic acid[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4):144-149.
- [7] 张云飞,黄安平,张文学,等. PLA/PBAT复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(1):154-158.
Zhang Yunfei, Huang Anping, Zhang Wenxue, et al. Research progress of PLA/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):154-158.
- [8] Worasak P, Neeranuch P. Preparation and characteristics of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(lactide acid) blend films via synergistic efficiency of plasticization and compatibilization[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2019, 37(1):68-78.
- [9] Deng Yixin, Yu Changyi, Thomas N L, et al. Optimising ductility of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends through co-continuous phase morphology[J]. Journal of Polymer and the Environment, 2018, 26(9):3 802-3 816.
- [10] Chaiwutthinan P, Chuayjuljit S, Srasomsun S, et al. Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite:Physical properties, morphology, and biodegradability[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(21):47 541-47 543.

(下转第135页)

- [16] 陶齐,傅光华,王天晴,等. 聚丙烯/超支化聚酯酰胺共混物的等温结晶动力学[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(1):88-92.
Tao Qi, Fu Guanghua, Wang Tianqing, et al. Isothermal crystallization kinetics of polypropylene/hyperbranched polyester amide blends[J]. Synthetic Resins and Plastics, 2020, 37(1):88-92.
- [17] 汪子健,孟寒,邵如,等. 热塑性聚酯弹性体 TPEE 的非等温结晶动力学[J]. 弹性体, 2020, 30(1):17-21.
Wang Zijian, Meng Han, Shao Ru, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of TPEE[J]. China Elastomerics, 2020, 30(1):17-21.
- [18] Papageorgiou D G, Papageorgiou G Z, Bikiaris D N, et al. Crystallization and melting of propylene-ethylene random copolymers. Homogeneous nucleation and nucleating agents[J]. European Polymer Journal, 2013, 49:1 577-1 590.
- [19] 周仕龙,向萌,杨菁菁,等. PP/PA6/SiO₂ 纳米复合材料的非等温结晶动力学[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):115-120.
Zhou Shilong, Xiang Meng, Yang Jingjing, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of PP/PA6/SiO₂ nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):115-120.

(上接第 122 页)

- Composites, 2018, 39(34):E2 006-E2 015.
- [12] Li Shineng, Gu Aijuan, Liang Guozheng, et al. A facile and green preparation of poly(glycidyl methacrylate) coated aramid fibers[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(18):8 960-8 968.
- [13] Wang Yifan, Sun Jun, Dai Lixing. The synthesis and solubility of a wholly aromatic polyamide containing para-and meta-substituted phenylene rings[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 320: 488-494.
- [14] Li Yang, Luo Zhu, Yang Le, et al. Influence of polyamide acid-coating reaction on the properties of aramid fibre[J]. Polymer, 2019, 178.doi:10.1016/j.polymer.2019.121550.
- [15] Wang Ben, Duan Yugang, Zhang Jingjing. Titanium dioxide nanoparticles-coated aramid fiber showing enhanced interfacial strength and UV resistance properties[J]. Materials & Design, 2016, 103:330-338.
- [16] 唐国平. 含杂环的芳香族共聚酯酰胺纤维在热处理过程中的结构与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
Tang Guoping. Study on structure and properties of heterocyclic aramid fiber with heat treatment[D]. Shanghai:Donghua University, 2013.
- [17] 张素凤,李鹏辉,刘媛,等. 热压温度对芳纶 1414 纤维/1313 浆粕复合纸微区结合特征的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5):1 003-1 008.
Zhang Sufeng, Li Penghui, Liu Yuan, et al. Effect of hot pressing temperature on inter-binding feature between para-aramid fiber and meta-aramid fibrils in composite paper[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5):1 003-1 008.
- [18] Jin Zhong, Luo Zhu, Yang Shirun, et al. Influence of complexing treatment and epoxy resin coating on the properties of aramid fiber reinforced natural rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(25).doi:10.1002/app.42122.

(上接第 128 页)

- [11] Andrzejewski J, Cheng J, Anstey A, et al. Development of toughened blends of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) for 3D printing applications:Compatibilization methods and material performance evaluation[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2020, 8(17):6 576-6 589.
- [12] Nakayama D, Wu Feng, Mohanty A K, et al. Biodegradable composites developed from PBAT/PLA binary blends and silk powder:compatibilization and performance evaluation[J]. ACS Omega, 2018, 3(10):12 412-12 421.
- [13] Racha A, Khalid L, Abderrahim M, et al. Rheological, morphological and interfacial properties of compatibilized PLA/PBAT blends[J]. Rheologica Acta, 2014, 53(7):501-507.
- [14] Wang Xin, Peng Shaoxian, Chen Hao, et al. Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in-situ reactive compatibilization[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 173.doi:10.1016/j.compositesb. 2019.107028.
- [15] 辜婷. PLA/PBS 共混体系结构及性能的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
Gu Ting. Study on the structure and properties of PLA/PBS blend system[D]. Guiyang:Guizhou University, 2018.
- [16] 张妍洁,吴栓庆,钟勇星,等. 多元环氧扩链剂对 PLA 增强 PBAT 性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2):7-11, 15.
Zhang Yanjie, Wu Shuanqing, Zhong Yongxing, et al. Effect of multi-functional epoxy chain extender on properties of reinforced PBAT blend[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):7-11, 15.
- [17] Xu Xiaodong, Dai Jinfeng, Ma Zhewen, et al. Manipulating inter-phase reactions for mechanically robust, flame-retardant and sustainable polylactide biocomposites[J]. Composites Parts B, 2020, 190.doi:10.1016/j.compositesb.2020.107930.
- [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.