



高韧 PLA/PBS 共混物的制备与性能研究

张妮, 朱曜峰

(浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为制备具有高韧性聚乳酸(PLA)材料, 以高反应活性的环氧无规低聚物(ADR)为反应性增容剂, 聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为增韧组分, 通过熔融共混法制备 PLA/PBS 共混物。利用场发射扫描电子显微镜、傅里叶红外光谱仪、旋转流变仪、热重分析仪、差示扫描量热仪、万能试验机和简支梁冲击试验机等对 PLA/PBS 共混物的形貌与结构、流变性能、热性能和力学性能等进行表征分析。结果表明: 在熔融共混过程中, 增容剂 ADR 与 PLA、PBS 发生原位反应, 形成接枝/嵌段共聚物, 极大改善了 PLA 与 PBS 的界面相容性; PBS 在 PLA/PBS 共混物中起到润滑的作用, 降低了 PLA/PBS 共混物的黏度, 促使 PLA/PBS 共混物柔韧性和延展性得到提升, PLA/PBS 共混物的断裂伸长率和冲击强度分别达到了 347.5% 和 6.8 kJ/m², 初始热分解温度为 342 °C, 表现出高韧性和良好的热稳定性。该研究为开发高韧性的 PLA 材料提供了实际指导。

关键词: 高韧性; 聚乳酸; 环氧无规低聚物; 聚丁二酸丁二醇酯; 共混物

中图分类号: TQ323.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 05-0315-08

引文格式: 张妮, 朱曜峰. 高韧 PLA/PBS 共混物的制备与性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(3): 315-322.

Reference Format: ZHANG Ni, ZHU Yaofeng. Study on the preparation and properties of a high-toughness PLA/PBS blend[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(3): 315-322.

Study on the preparation and properties of a high-toughness PLA/PBS blend

ZHANG Ni, ZHU Yaofeng

(School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To prepare polylactic acid (PLA) materials with high toughness, a PLA/PBS blend was prepared by melt blending with highly reactive epoxy random oligomer (ADR) as reactive compatibilizer and polybutylene succinate (PBS) as toughening component. The morphology and structure, rheological properties, thermal properties and mechanical properties of the PLA/PBS blend were characterized and analyzed by field emission scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectrometer, rotational rheometer, thermogravimetric analyzer, differential scanning calorimeter, universal testing machine and simply supported beam impact testing machine. The results showed that during the melt blending process, the compatibilizer ADR reacted in situ with PLA and PBS to form graft/block copolymers, which greatly improved the interfacial compatibility between PLA and PBS; PBS played a lubricating role in the PLA/PBS blend, reduced the viscosity of the PLA/PBS blend, and improved the flexibility and ductility of the PLA/PBS blend. The elongation at break and impact strength of the PLA/PBS blend reached 347.5% and 6.8 kJ/m², respectively, and the initial thermal decomposition temperature was 342 °C, showing high toughness and good thermal stability. This study provides practical guidance for the development of high-toughness PLA materials.

Key words: high toughness; polylactic acid; epoxy random oligomer; poly(butylene succinate); blend

收稿日期: 2024-06-03 网络出版日期: 2024-09-13

基金项目: 校企合作产学研项目(20210733-J)

作者简介: 张妮(1999—), 女, 湖南张家界人, 硕士研究生, 主要从事聚合物加工方面的研究。

通信作者: 朱曜峰, E-mail: yfzhu@zstu.edu.cn

0 引言

塑料制品以优异的阻隔性、密封性、加工性、耐用性等优势在日常生活中应用广泛。然而,大多数塑料制品却存在不可降解且回收再利用率低等问题,对人类生态环境造成了严重危害^[1]。因此,生物可降解塑料材料的开发和利用受到了广泛关注。聚乳酸(PLA)材料具有良好的生物相容性、高拉伸强度以及良好的透明性^[2],在部分领域具有替代传统塑料的潜力^[3-4]。然而,PLA 材料脆性大、断裂伸长率低以及耐冲击性能差,导致其韧性较差,在应用时受到限制。选择具有良好韧性的生物可降解聚合物与 PLA 熔融共混是提升 PLA 韧性的有效途径之一^[5]。

生物可降解材料聚丁二酸丁二醇酯(PBS)具有优异的柔韧性、良好的耐热性及可加工性,有望作为增韧组分,通过共混改性提升 PLA 的韧性。Bhatia 等^[6]将 PBS 与 PLA 熔融共混制备 PLA/PBS 共混物,结果发现:加入 10%~80% 质量分数的 PBS 后,共混物的断裂伸长率均小于 10%,具有较差的韧性。由于 PBS 和 PLA 间的界面相容性差,直接共混并不能有效提升 PLA 的韧性。因此,如何改善 PLA 与 PBS 之间的界面相容性,成为有效提升 PLA 韧性,进而获得高性能 PLA/PBS 共混物的关键要素。Supthanyakul 等^[7]以乳酸、丁二酸和 1,4-丁二醇为原料,通过缩聚反应制备了聚(丁二酸丁二醇酯-乳酸)(rPBSL),并将其作为增容剂与 PLA 与 PBS 熔融共混,结果表明:rPBSL 可改善 PLA 与 PBS 间的界面相容性,PLA/PBS 共混物的韧性提升。赵楠等^[8]以 PBS 和甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)为原料,采用熔融共混法制备 PBS-g-GMA 接枝物,并以此接枝物为增容剂,制备了 PLA/PBS-g-GMA/PBS 共混物,结果显示:当 PBS-g-GMA 质量分数为 5% 时,共混物的断裂伸长率约为 65.4%。辜婷等^[9]采用聚 ϵ -己内酯(PCL)为增容剂,通过熔融共混法制备了 PLA/PBS/PCL 共混物,结果发现:当 PCL 质量分数为 3.0% 时,共混物的冲击强度达到 5.6 kJ/m²。加入增容剂后,PLA/PBS 共混物的韧性有一定提升,但由于 rPBSL、PBS-g-GMA、PCL 等物理性增容剂增容效果较差,无法实现韧性的有效提升。因此选择具有高反应活性的增容剂是制备高韧性 PLA/PBS 共混物有效途径。

相关研究表明,具有高反应活性的多功能环氧

无规低聚物(ADR)增容剂可用于多种聚合物共混体系,有效改善聚合物间的相容性,提高共混物的韧性^[10-11]。本文选择 ADR 作为反应型增容剂,PBS 为增韧剂,通过熔融共混法制备了 PLA/PBS 共混物,采用场发射扫描电子显微镜和傅里叶红外光谱仪对 PLA/PBS 共混物的形貌与结构进行表征,并详细探讨了 PBS 及 ADR 对 PLA/PBS 共混物流变性能、热性能和力学性能的影响。研究结果将为开发高韧性 PLA 材料提供策略支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器设备

主要材料:PLA(2003D)购自美国 Nature Works 公司;PBS(TH803S)购自新疆蓝山屯河化工股份有限公司;反应型增容剂(ADR 4370s)购自德国 BASF 公司。

主要仪器:密炼机(RM-200C,哈尔滨哈普电气技术有限公司);平板硫化机(XLB-D,湖州南浔和孚新玛丽橡胶机械厂);微型注塑机(SZS-20,武汉瑞明实验室仪器有限公司);电子天平(YP1201 N,上海精密科学仪器有限公司);真空干燥箱(DZF-6020,上海精宏实验设备有限公司);场发射扫描电子显微镜(Sigma 300,德国 ZEISS 公司);傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS50,美国 Thermo Fisher Scientific 公司);熔融指数仪(T400C,上海千实精密机电科技有限公司);旋转流变仪(MCR702e TwinDrive,奥地利 Anton Paar GmbH 公司);热重分析仪(TGA/DSC1,瑞士 METTLER TOLEDO 公司);差示扫描量热仪(DSC3,瑞士 METTLER TOLEDO 公司);万能试验机(34TM-30,美国 Instron 公司);简支梁冲击试验机(RXJ-50B,深圳市瑞格尔仪器有限公司)。

1.2 PLA/PBS 共混物的制备

将 PLA 和 PBS 原料在 80 °C 真空烘箱中干燥 24 h,ADR 在 60 °C 下干燥 24 h,以去除原料中的水分。将 PLA 和 PBS 按照质量比 100/0、90/10、80/20、70/30、60/40 和 0/100 的比例分别添加至密炼机中,在 190 °C 以 60 r/min 转速熔融共混 10 min。根据 PBS 含量可将共混物命名为 PLA、L9B1、L8B2、L7B3、L6B4 和 PBS。

将 PLA、PBS 和 ADR 按照质量比 36/4/1、32/8/1、28/12/1、24/16/1 的比例分别添加至密炼机中,采用相同的试验条件制得共混物。共混物命名为 L9B1A、L8B2A、L7B3A 和 L6B4A。

以共混物母粒为原料,采用热压成型和注塑成型制备 PLA/PBS 共混物测试样条备用。利用平板硫化机制备拉伸测试样条及膜样品,热压成型工艺条件为:热压温度设置为 190 ℃,热压压力为 10 MPa,预热时间 8 min,热压时间 5 min;利用微型注塑机制备冲击样条,注塑成型工艺条件为:熔融温度设置为 190 ℃,模具温度为 40 ℃,注射冲模时间为 1 s,保压时间为 15 s,压力设置在 0.4~0.6 MPa。

1.3 测试与表征

1.3.1 形貌观测

采用场发射扫描电子显微镜(SEM)在 3 kV 的加速电压下观察试样的断面形貌。

1.3.2 化学结构测试

采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)对试样的化学结构进行表征,分辨率 4 cm^{-1} ,波数范围 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.3 熔体质量流动速率测试

采用熔融指数仪对试样的熔体质量流动速率进行测试。测试方法按照 GB/T 3682.1—2018《塑料热塑性塑料熔体质量流动速率(MFR)和熔体体积流动速率(MVR)的测定 第 1 部分:标准方法》,温度设定为 190 ℃,标称负荷为 2.16 kg,根据规定时间内试样的挤出质量计算挤出速率($\text{g}/(10\text{ min})$)。

1.3.4 流变性能测试

采用旋转流变仪对试样进行测试,测试温度设置

为 190 ℃,频率范围为 0.1~100 rad/s,应变为 1%。

1.3.5 热性能测试

采用热重分析仪(TGA)和差示扫描量热仪(DSC)测试试样的热性能。

1.3.6 力学性能测试

采用万能试验机和简支梁冲击试验机对试样的力学性能进行测试,拉伸试验方法参照 GB/T 1040.2—2022《塑料 拉伸性能的测定 第 2 部分:模塑和挤塑塑料的试验条件》,拉伸速度为 10 mm/min,冲击强度试验方法参照 GB/T 1843—2008《塑料 悬臂梁冲击强度的测定》,摆锤能量为 7.5 J。

2 结果与讨论

2.1 PLA/PBS 共混物的形貌与化学结构分析

图 1 为 PLA/PBS 共混物的 SEM 图。由图 1(a)—(d)可知,未添加 ADR 增容剂的试样表明 PLA 和 PBS 不相容^[12],二者相界面清晰,共混物呈现明显的“海-岛”结构。随着 PBS 质量分数的增加,PBS 颗粒尺寸变大,这归因于 PLA 和 PBS 熔融共混过程中,随着 PBS 含量的增多,PBS 粒子更容易发生相互碰撞而聚集^[13],PBS 粒径增大导致 PLA/PBS 共混物中相分离更明显。加入相容剂 ADR 后,PLA 基体中的 PBS 粒径明显变小,相界面变模糊,表明 ADR 使 PLA 与 PBS 的相界面黏附力加强,两相相容性得到明显改善。

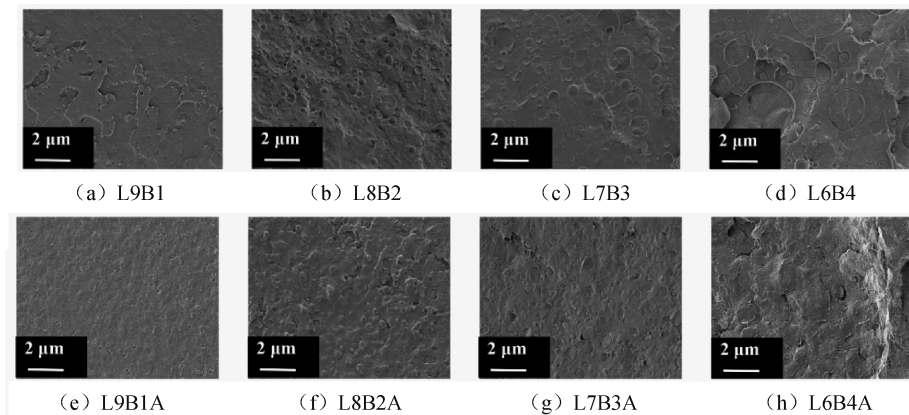


图 1 PLA/PBS 共混物的 SEM 图像

用红外光谱研究试样在共混过程中基团结构变化,图 2 为 PLA/PBS 共混物的红外光谱图。从中可知,PLA 在 1745 、 1180 、 1080 cm^{-1} 出现吸收峰,分别为 PLA 的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰^[14]和 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的弯曲振动峰^[15]。PBS 在 2946 、 1154 、 1715 cm^{-1} 处出现吸收峰,分别为 PBS 主链中亚甲基基团的不对称变形振动峰^[16]、 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩和 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动

峰^[17]。ADR 在 1725 、 908 、 760 、 700 cm^{-1} 处出现吸收峰,分别为 ADR 的羰基^[18]、环氧基团^[14]和苯环^[19]的特征吸收峰。PLA/PBS 共混物拥有与 PLA、PBS 相同的吸收峰,且共混物在 700 、 760 cm^{-1} 处出现了明显的吸收峰,在 908 cm^{-1} 处不存在环氧基吸收峰,表明 ADR 的环氧基团与 PLA、PBS 的末端羟基或羧基在熔融共混时发生反应。

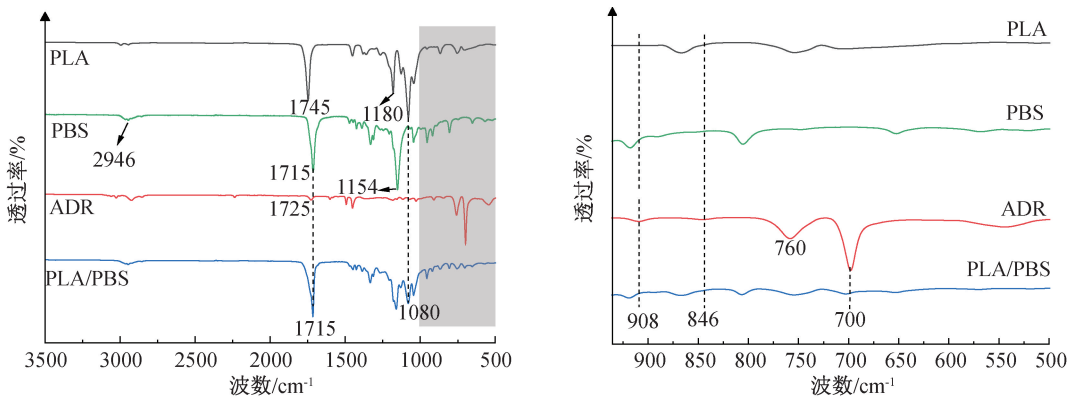


图 2 PLA/PBS 共混物的 FTIR 图

为进一步研究 ADR 与 PLA、PBS 之间的相互作用,对 PLA/PBS 共混物的 MFR 进行测试,ADR 与 PLA、PBS 的反应机理见图 3。结果发现:PLA、PBS 和 L7B3 共混物的 MFR 值分别为 5.0、20.0、7.5 g/(10 min);当加入 ADR 后,L7B3A 共混物的

MFR 下降至 1.3 g/(10 min),这表明 ADR 可实现 PLA 和 PBS 之间扩链/交联作用^[20]。由图 3 可知,ADR 中存在多个高反应活性的环氧基团。这些活性基团可以与 PLA、PBS 的端羟基/羧基发生反应,从而将两组分衔接起来,改善了两相间的相容性^[21-22]。

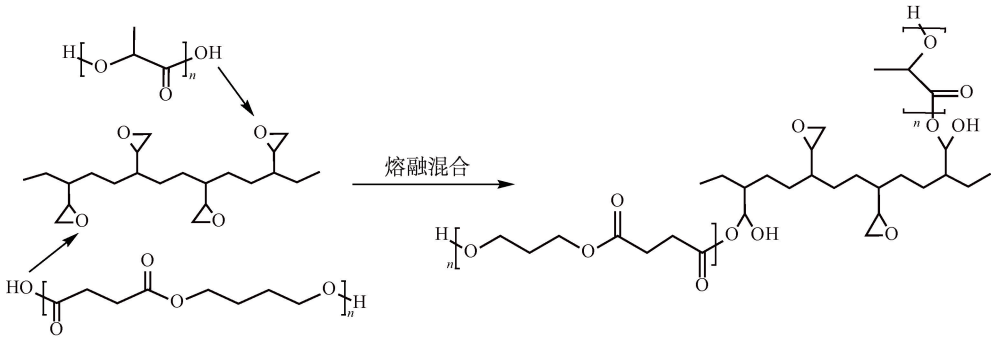


图 3 ADR 与 PLA、PBS 的反应机理

2.2 PLA/PBS 共混物的流变性能分析

图 4 为 PLA/PBS 共混物熔融状态下的动态旋转流变曲线。图 4(a)—(b)为 PLA/PBS 共混物的储能模量 G' 与损耗模量 G'' 随角频率 ω 变化的曲线,分别反映了共混物在熔融状态下的弹性特征和黏性特征。由图 4(a)可知,PLA/PBS 共混物的 G' 随着 ω 的增大而增大。其主要原因在于随着 ω 的增加,共混物分子链运动速度跟不上外力作用变化,导致分子链不能及时回复。在低频区,PLA/PBS 共混物的 G' 均高于纯 PLA,这归因于 PBS 分散相在震荡剪切作用下出现变形和回复^[23]。同时,共混物的 $G' \sim \omega$ 曲线出现“第二平台”,这是因为随着 ADR 的加入,PLA 与 PBS 交联作用增强,共混物体系中分子链相互缠结,从而形成特殊的网络结构。在高频区,PLA/PBS 共混物的 G' 均低于 PLA,这归因于 PLA 和 PBS 分子链在高剪切速率下发生解缠结^[24]。由图 4(b)可知,PLA/PBS 共混物的 G'' 随着 ω 的增加而增大,这归因于共混物分

子链间的运动阻力增加。图 4(c)为 PLA/PBS 共混物的复数黏度 η^* 随 ω 变化的曲线。由图 4(c)可知,PLA/PBS 共混物的 η^* 随着 ω 的增大而减小,呈现“剪切变稀”的假塑性流体特征^[25]。随着 PBS 含量的增加,PLA/PBS 共混物的 η^* 逐渐降低。这是因为柔性 PBS 与 PLA 共混过程中起到了“润滑”的作用,减少了 PLA 分子链之间的运动阻力,导致 PLA 自由体积增加,从而降低了 PLA/PBS 共混物的黏度^[26]。因此,由于 PBS 与 PLA 界面之间的润滑作用使得 PLA 链段的流动性、柔韧性和延展性增加。

2.3 PLA/PBS 共混物的热性能分析

图 5 为 PLA/PBS 共混物的 DSC 曲线图。从图 5 可知,纯 PLA 的玻璃化转变温度(T_g)为 63 $^{\circ}\text{C}$,熔融温度(T_m)约为 150 $^{\circ}\text{C}$ 。升温过程中在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现宽峰,属于 PLA 的冷结晶峰,表明 PLA 的结晶性能较差。PLA/PBS 共混物在 114 $^{\circ}\text{C}$ 左右和 150 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现两个明显的峰,分别对应 PBS 和 PLA 的熔融峰。当引入 PBS 后,共混物中 PLA 的 T_g 、 T_m 和冷结

晶温度(T_{cc})均向低温方向移动。这归因于 PBS 分子结构中的柔性链段在 PLA 基体中产生自由体积^[27], 降低了 PLA 分子链间的作用力, 从而降低 PLA 的

T_g ; PLA 分子链的空间位阻降低, 促使 PLA 链段在低温时就具有足够的运动能力进行规整排列而结晶^[28], 导致 PLA 的 T_{cc} 和 T_m 降低。

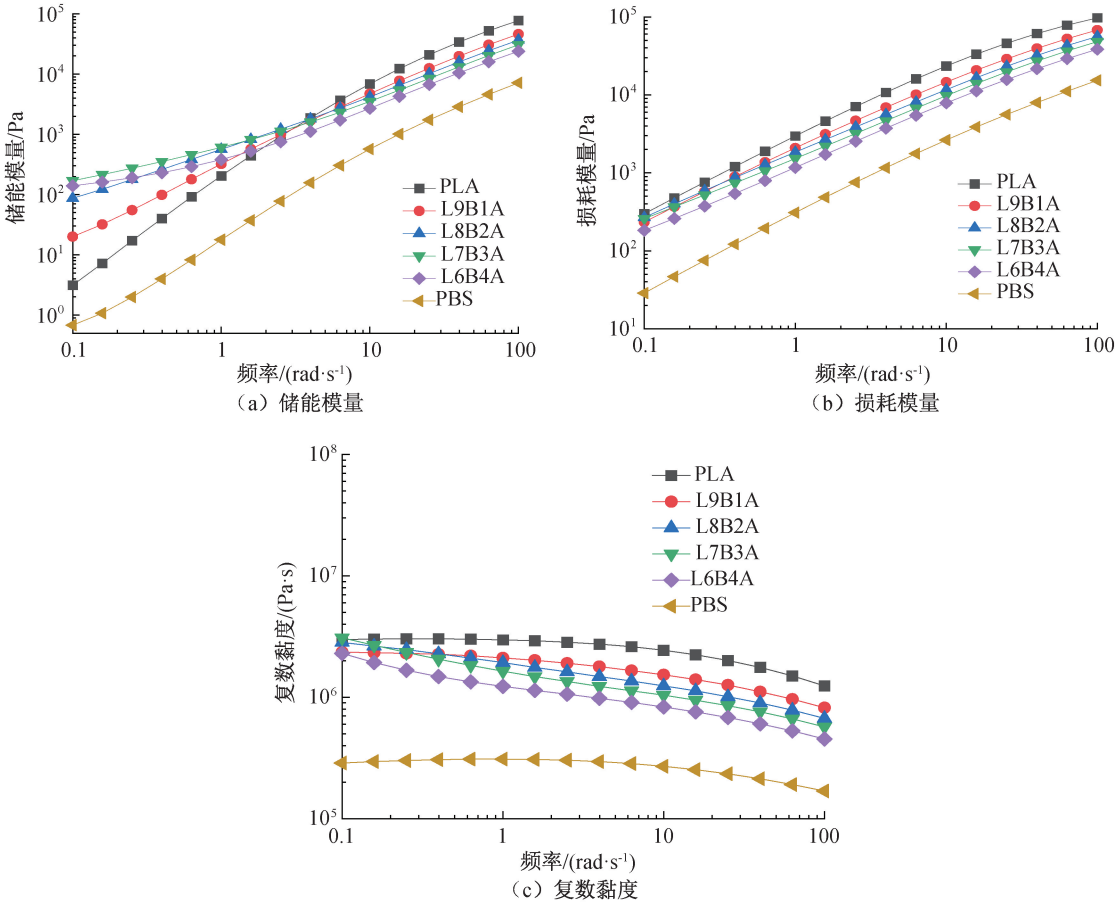


图 4 PLA/PBS 共混物的流变性能

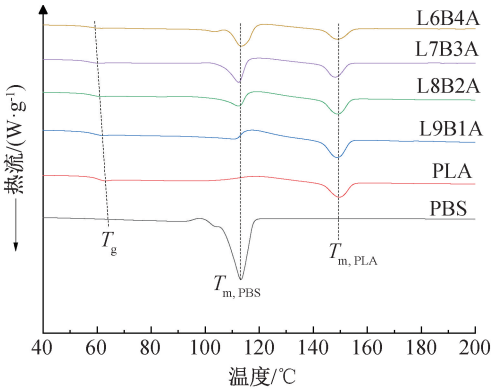


图 5 PLA/PBS 共混物的 DSC 曲线

采用热重分析仪在氮气气氛下对 PLA/PBS 共混物的热稳定性进行测试分析。图 6 为 PLA/PBS 共混物的 TGA 曲线和相应的一阶导数曲线。表 1 汇总了在升温过程中样品的初始分解(样品失重 5%)、样品失重 10%、样品失重 50%对应的温度。由图 6(a)和表 1 可知,PBS 热稳定性大于 PLA。同时,PLA/PBS 共混物的热稳定性随着 PBS 含量的

增加有一定幅度的下降。这是由于 PBS 与 ADR 发生了反应,降低了共混物的热稳定性^[26]。但 PLA/PBS 共混物整体仍保持了良好的热稳定性。由图 6(b)可知,PLA/PBS 共混物出现 2 个分解阶段。第一阶段在 377 °C 左右,属于 PLA 的热分解损失;第二阶段出现在 408 °C,对应 PBS 的热降解。上述现象表明,PLA/PBS 共混体系具备良好的热稳定性和较宽的加工窗口。宽的热加工窗口使其适用于注塑成形、挤出成形和热压成形等热加工工艺^[29]。

表 1 PLA/PBS 共混体系热失重分析数据			
样品	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{50\%}/^{\circ}\text{C}$
PLA	345	353	374
L9B1A	341	349	371
L8B2A	341	350	371
L7B3A	342	349	373
L6B4A	339	347	373
PBS	353	365	400

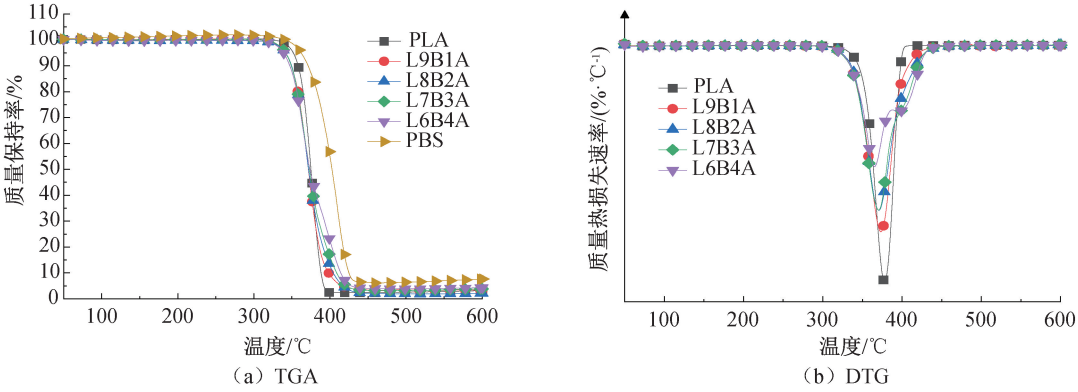


图 6 PLA/PBS 共混物的热失重曲线图

2.4 PLA/PBS 共混物的力学性能分析

采用万能试验机和简支梁冲击试验机测试 PLA/PBS 共混物的力学性能。图 7 为 PLA/PBS 共混物的应力-应变、拉伸强度、弹性模量、断裂伸长率和冲击强度曲线图。由图 7(a)可知,PLA 是一种脆而硬的聚合物,拉伸测试过程中未出现屈服现象。而 PLA/PBS 共混物在拉伸过程中存在明显的细颈现象,共混物表现出高韧性。由图 7(b)—(d)可知,PLA/PBS 共混物拉伸强度和弹性模量与 PBS 含量

呈负相关。同时,随着 PBS 含量的增加其断裂伸长率和冲击强度先增大后减小。其中,L7B3A 的断裂伸长率和冲击强度与纯 PLA 相比明显提升,达到了 347.5%和 6.8 kJ/m²,分别提升了约 64.6 倍和 1.3 倍。韧性提高主要是因为 ADR 改善了 PLA 与 PBS 之间的界面相容性,使得两相间的界面黏附力增强。当共混物受到外力作用时,PBS 颗粒不容易从 PLA 基体中脱黏,促使应力在两相组分间得到更好的传递^[30]。

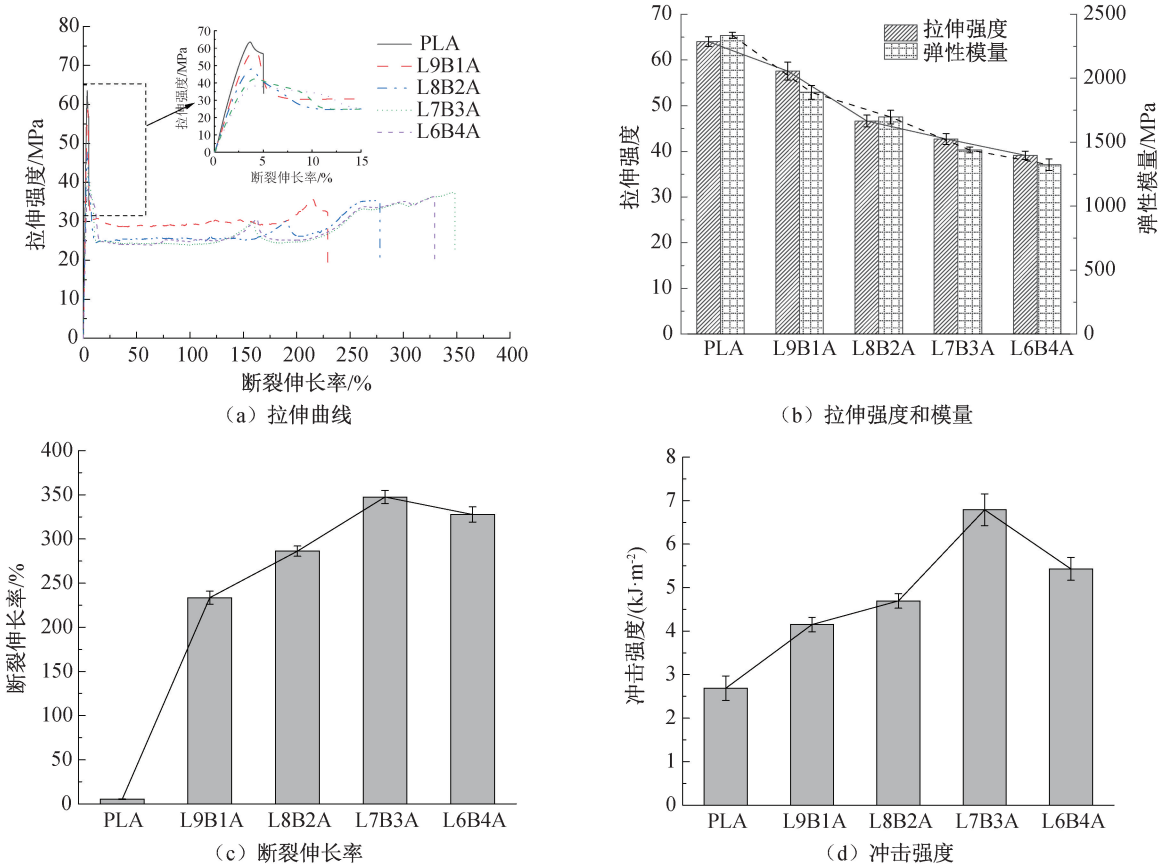


图 7 PLA/PBS 共混物的力学性能

3 结 论

本文以 PLA 为基体、PBS 和 ADR 为改性组分,通过熔融共混法制备了具有高韧性特性的 PLA/PBS 共混物,并对 PLA/PBS 共混物的结构与性能进行分析,所得主要结论如下:

a) ADR 增容剂通过与 PLA、PBS 末端基团发生反应形成接枝/嵌段共聚物,改善了 PLA 与 PBS 的界面相容性,增加了两相间的界面黏附力。

b) 加入 PBS 后,由于 PBS 与 PLA 界面之间的润滑作用,减少了 PLA 分子链之间的运动阻力,从而降低了 PLA/PBS 共混物的黏度,促使共混物柔韧性和延展性增加。

c) 加入 PBS 和 ADR 后,PLA/PBS 共混物韧性具有明显提升,当 PLA 与 PBS 质量比为 7:3 时,共混物断裂伸长率及冲击强度达到最佳,分别为 347.5% 和 6.8 kJ/m²,较纯 PLA 相比提高了约 64.6 倍和 1.3 倍。

d) PLA/PBS 共混物初始热降解温度约为 342 ℃,具备良好的热稳定性和较宽的加工窗口,可适用于多种热成型工艺。

参考文献:

- [1] Ali W, Ali H, Gillani S, et al. Poly(lactic acid) synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(3): 1761-1786.
- [2] Shahdan D, Rosli N A, Chen R S, et al. Strategies for strengthening toughened poly(lactic acid) blend via natural reinforcement with enhanced biodegradability: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 251: 126214.
- [3] Pasha H Y, Mohtasebi S S, Taherimehr M, et al. New poly(lactic acid)-based nanocomposite films for food packaging applications[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2023, 32(7): 855-871.
- [4] He S Y, Hu S K, Wu Y W, et al. Polyurethanes based on polylactic acid for 3D printing and shape-memory applications[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(10): 4192-4202.
- [5] Yang Y, Zhang L, Xiong Z, et al. Research progress in the heat resistance, toughening and filling modification of PLA[J]. *Science China Chemistry*, 2016, 59: 1355-1368.
- [6] Bhatia A, Gupta R K, Bhattacharya S N, et al. Compatibility of biodegradable poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene succinate) (PBS) blends for packaging application[J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2007, 19(3): 125-131.
- [7] Supthanyakul R, Kaabbuathong N, Chirachanchai S. Random poly(butylene succinate-co-lactic acid) as a multi-functional additive for

miscibility, toughness, and clarity of PLA/PBS blends[J]. *Polymer*, 2016, 105: 1-9.

- [8] 赵楠, 揣成智, 王彪. PBS-g-GMA 对 PLA/PBS 共混体系的增容性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, 27(11): 65-68.
- [9] 辜婷, 朱大勇, 郑强, 等. 聚ε-己内酯对聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯共混体系性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(2): 42-47.
- [10] Kahraman Y, Özdemir B, Kılıç V, et al. Super toughened and highly ductile/n PLA/n//n TPU/n blend systems by in situ reactive interfacial compatibilization using multifunctional epoxy - based chain extender[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138: 50457.
- [11] 杨皓然, 黄柯柯, 刘钢, 等. 高韧、耐热 PLA/PCL 共混材料的制备与性能研究[J]. *塑料科技*, 2022, 50(5): 1-6.
- [12] Prasitnok O, Prasitnok K. Molecular dynamics simulations of copolymer compatibilizers for polylactide/poly(butylene succinate) blends[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2023, 25(7): 5619-5626.
- [13] 梁宁宁, 熊祖江, 王锐, 等. 聚左旋乳酸/聚丁二酸丁二醇酯共混物的结构与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(3): 48-53.
- [14] Li L, Wang H Y, Jiang T J, et al. Effect of epoxy chain extenders on molecular structure and properties of polylactic acid[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(36): e54379.
- [15] Cai Y M, Lv J G, Feng J M. Spectral characterization of four kinds of biodegradable plastics: poly(lactic acid), poly(butylenes adipate-co-terephthalate), poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and poly(butylenes succinate) with FTIR and Raman spectroscopy[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2013, 21(1): 108-114.
- [16] Phua Y J, Chow W S, Mohd Ishak Z A. Reactive processing of maleic anhydride-grafted poly(butylene succinate) and the compatibilizing effect on poly(butylene succinate) nanocomposites[J]. *Express Polymer Letters*, 2013, 7(4): 340-354.
- [17] Chikh A, Benhamida A, Kaci M, et al. Synergistic effect of compatibilizer and sepiolite on the morphology of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/poly(butylene succinate) blends[J]. *Polymer Testing*, 2016, 53: 19-28.
- [18] 朱延谭, 朱从山, 刘志强, 等. 苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物对 PA66/PPO/SEBS 体系的增容作用研究[J]. *塑料工业*, 2018, 46(1): 33-36.
- [19] Gu Z H, Zhang J G, Cao W, et al. Extraordinary toughness and heat resistance enhancement of biodegradable PLA/PBS blends through the formation of a small amount of interface-localized stereo complex crystallites during melt blending[J]. *Polymer*, 2022, 262: 125454.
- [20] Luo J, Meng X, Gong W G, et al. Improving the stability and ductility of polylactic acid via phosphite functional polysilsesquioxane[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(43): 25151-25157.

[21] Grigora M E, Terzopoulou Z, Tsongas K, et al. Influence of reactive chain extension on the properties of 3D printed poly (lactic acid) constructs[J]. *Polymers*, 2021, 13(9): 1381.

[22] 胡顺朋. PBAT/PLA 共混体系的增韧增强及低成本改性探究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022: 15-53.

[23] 蔡小琳. 小分子反应性增容 PLA/PBS 共混物结构和性能研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020: 14-53.

[24] Li X, Ai X, Pan H W, 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): 1706-1717.

[25] Orisawayi A O, Koziol K, Hao S, et al. Development of hybrid electrospun alginate-pulverized moringa composites[J]. *RSC Advances*, 2024, 14(12): 8502-8512.

[26] Zhang C H, Wan L, Gu H, et al. Preparation and properties of foamed cellulose acetate/polylactic acid blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2021, 61(12): 3069-3081.

[27] Sun Y F, Sun G. A natural butter glyceride as a plasticizer for improving thermal, mechanical, and biodegradable properties of poly (lactide acid) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263(Pt 2): 130366.

[28] Fortunati E, Gigli M, Luzi F, et al. Processing and characterization of nanocomposite based on poly (butylene/ triethylene succinate) copolymers and cellulose nanocrystals [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 165: 51-60.

[29] Zafar R, Lee W, Kwak S Y. A facile strategy for enhancing tensile toughness of poly(lactic acid) (PLA) by blending of a cellulose bio-toughener bearing a highly branched polycaprolactone[J]. *European Polymer Journal*, 2022, 175: 111376.

[30] Ge Q Y, Dou Q. Preparation of supertough polylactide/ polybutylene succinate/epoxidized soybean oil bio-blends by chain extension [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(26): 9620-9629.

(责任编辑:刘国金)