



反应性梳状共聚物增容改性 PLA/PBAT 共混材料的制备及其结构与性能分析

邬豪益, 朱曜峰

(1. 浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省现代纺织技术创新中心
(鉴湖实验室), 浙江绍兴 312000)

摘要: 为增强聚乳酸/聚对苯二甲酸己二酸丁二酯(PLA/PBAT)共混体系的相容性并提高 PLA/PBAT 共混材料的冲击强度和拉伸韧性, 制备了 PBAT 接枝苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯梳状共聚物(BSGE)反应性增容剂, 进一步通过反应性挤出的方式制备得到改性 PLA/PBAT 共混材料。采用核磁共振波谱仪、傅里叶红外光谱仪、旋转流变仪和扫描电子显微镜分析 BSGE 对 PLA/PBAT 共混材料的化学结构、流变特性及微观形貌的影响, 并通过差示扫描量热仪表征改性 PLA/PBAT 共混材料热性能, 通过万能材料试验机和摆锤冲击试验机测试改性 PLA/PBAT 共混材料力学性能。结果表明: 加入 BSGE 后, PLA/PBAT 共混材料内部形成了双接枝共聚物, 双组分共混物的相区结构由明显的海-岛结构转变为共连续相结构, 界面相容性得到明显改善, 且断裂伸长率和冲击强度分别达到了 346.2% 和 35 kJ/m², 力学性能优异, 应力在材料内得以有效传递, 充分发挥了 PBAT 的增韧效果。该研究可为开发高性能 PLA/PBAT 可降解共混材料提供了理论依据。

关键词: 聚乳酸; 聚对苯二甲酸己二酸丁二酯; 反应性增容剂; 相容性; 力学性能

中图分类号: TS332

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)01-0042-10

引文格式: 邬豪益, 朱曜峰. 反应性梳状共聚物增容改性 PLA/PBAT 共混材料的制备及其结构与性能分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(1): 42-51.

Reference Format: WU Haoyi, ZHU Yaofeng. Preparation of a PLA/PBAT blend compatibilized with reactive comb-shaped copolymer and analysis of its structure and properties[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(1): 42-51.

Preparation of a PLA/PBAT blend compatibilized with reactive comb-shaped copolymer and analysis of its structure and properties

WU Haoyi, ZHU Yaofeng

(1. School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology (Jianhu Laboratory), Shaoxing 312000, China)

Abstract: To enhance the compatibility of polylactic acid/poly(butylene adipate terephthalate) (PLA/PBAT) blend system and improve the impact strength and tensile toughness of the blend, the PBAT grafted poly(styrene-glycidyl methacrylate) copolymer (BSGE) was made as a reactive compatibilizer, and a modified PLA/PBAT blend was prepared through reactive extrusion. The influence of BSGE on the chemical structure, rheological properties, and microstructure of the PLA/PBAT blend was studied by using nuclear magnetic resonance spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, rotational rheometer, and scanning electron microscopy. Its thermal properties were investigated by differential

收稿日期: 2024-03-11 网络出版日期: 2024-06-12

基金项目: 杭州市聚酯类生物可降解树脂的改性研究项目(20210733-J)

作者简介: 邬豪益(1999—), 男, 浙江海宁人, 硕士研究生, 主要从事可降解材料的制备与改性研究。

通信作者: 朱曜峰, E-mail: yfzhu@zstu.edu.cn

scanning calorimeter, and its mechanical performance was studied by using a universal testing machine and pendulum impact tester. The results showed that with the addition of BSGE, double graft copolymers were formed within the blend, the phases zone structure of the bi-component blend changed from distinct sea island structure to co-continuous phase structure, the interface compatibility was significantly improved, and the elongation at break and impact strength reached 346.2% and 35 kJ/m², respectively, demonstrating excellent mechanical properties. Furthermore, the stress was effectively transmitted within the material, allowing full play to the toughening effect of PBAT. The article provides a theoretical basis for the development of high-performance PLA/PBAT biodegradable blends.

Key words: polylactic acid; poly(butylene adipate terephthalate); reactive compatibilizer; compatibility; mechanical properties

0 引言

现代塑料工业的快速发展给社会生活带来便捷的同时,也给人类健康和自然环境造成了危害^[1],开发和使用可降解材料成为解决塑料污染的重要途径之一。当前,主要的可降解材料包括聚乳酸(PLA)^[2]、聚羟基丁酸戊酸酯(PHBV)^[3]和聚羟基脂肪酸酯(PHA)^[4]等。其中,PLA 因原料来源广泛、易加工及良好的生物相容性好等优点,并且具有替代部分传统塑料制品的潜力,成为使用最广泛的可降解材料之一;但 PLA 也存在脆性大、断裂伸长率低与耐冲击弱等力学性能缺点^[2]。将 PLA 与具有良好韧性特性的聚合物进行共混,是改善 PLA 力学性能的方式之一。聚对苯二甲酸己二酸丁二酯(PBAT)作为一种可生物降解材料,具有良好的拉伸韧性和耐热性能,可与 PLA 形成性能互补^[5]。因此,PLA/PBAT 共混体系的研究被学界广泛关注。

PLA 和 PBAT 具有相近的溶度参数,但两者仍然属于热力学不相容体系^[6-7],直接共混会出现明显的相分离现象,对 PLA 的增韧效果不理想。目前,改善 PLA/PBAT 共混体系相容性最主要的方法是添加增容剂,增容剂主要有无机粒子^[8]、纤维素^[9]等非反应性增容剂以及带有环氧^[10]、异氰酸酯^[11]和酸酐^[12]等官能团的反应性增容剂。

反应性增容剂在共混过程中可与共混物发生化学反应,增强其界面黏合作用,是解决共混体系相容性差的重要途径。廉价、易用的线形环氧型增容剂具有活泼的环氧官能团,在熔融共混的过程中与 PLA 和 PBAT 的端羧基发生反应形成双接枝共聚物,促使与共混体系组分间发生有效缠结,起到增容效果^[13-14]。然而,实际熔融共混过程中所形成的双接枝共聚物会偏离共混组分相界面,并在某一相中形成胶束,使增容效果降低。Jeon 等^[15]和 Inoue 等^[16]分析了线形扩链剂在双组分共混物中的胶束

形成机理,发现高含量、高反应活性的组分与扩链剂优先反应,而另一组分的接枝反应则会受到抑制,形成不对称的双接枝共聚物,致使与共混体系中不同组分间的相互作用存在差异,易进入单一相形成胶束^[17]。Wang 等^[18]发现线形环氧扩链剂在 PLA/PBAT 共混体系中更易与 PLA 发生反应,难以充分发挥增容效果。

针对线性反应性增容剂在 PLA/PBAT 共混体系中形成不对称双接枝共聚物致使无法实现有效增容共混体系的问题,本文通过反应性接枝法将线形环氧扩链剂——苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯扩链剂(Styrene-GMA extender,SGE)与 PBAT 进行接枝反应,制备得到反应性梳状增容剂——PBAT 接枝 SGE 共聚物(BSGE),并将其与 PLA 和 PBAT 熔融共混,制备得到增容改性的 PLA/PBAT 共混材料;分析 BSGE 对 PLA/PBAT 体系相容性、力学性能、流变性能和热性能的影响,为开发高性能 PLA/PBAT 可降解材料提供参考依据。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 试验材料

左旋聚乳酸(3001 D, $M_w=2.07\times10^5$ g/mol, $M_n=1.20\times10^5$ g/mol)购买自美国 NatureWorks 公司;PBAT (TH801 T, $M_n=6.64\times10^5$ g/mol, $M_w=8.5\times10^5$ g/mol)购买自新疆蓝山屯河聚酯有限公司和苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯扩链剂($M_w=7250$ g/mol)购买自德国巴斯夫公司。

1.1.2 实验仪器

转矩流变仪(Haake PolyLab OS,美国赛默飞世尔科技公司);微型双螺杆挤出机(SJZS-10J,武汉瑞鸣实验仪器制造有限公司);微型注塑机(SJZS-10J,武汉瑞鸣实验仪器制造有限公司);真空干燥箱

(DZF-6020, 上海精宏实验设备有限公司); 电子天平(AL204, 梅特勒托利多仪器有限公司); 小型平硫化机(CRER-6014C-30, 东莞科技锐仪器有限公司); 傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS50, 美国赛默飞世尔科技公式); 核磁共振波谱仪(Avance NEO 600 MHz, 德国布鲁克); 扫描电子显微镜(Sigma 600, 德国蔡司); 差示扫描量热仪(DSC 214 Polyma, 德国耐驰)和旋转流变仪(MCR702e, 奥地利安东帕)。

1.2 试样制备

1.2.1 BSGE 反应性增容剂的制备

将 PBAT 和 SGE 在真空烘箱中干燥除水, 称取 100 g PBAT 和 50 g SGE 置于转矩流变仪中, 在 190 °C 和 50 r/min 下共混 10 min, 制得 BSGE 反应性增容剂。

1.2.2 增容改性 PLA/PBAT 共混材料的制备

首先, 称取 70 g PLA、32 g PBAT、1 g SGE 在相同条件下直接熔融共混, 制备了 SGE 直接改性 PLA/PBAT 共混材料, 反应过程如图 1(a) 所示。其次, 将预先干燥的 PLA、PBAT、BSGE 原料按照一定质量比在微型双螺杆挤出机进行熔融共混, 其中微型双螺杆挤出机从进料段到口模由三段温度控制分别为 180、190 °C 和 180 °C, 螺杆转速为 50 r/min, 最终制得 BSGE 增容改性 PLA/PBAT 共混材料(具体试样配比见表 1), 反应过程如图 1(b) 所示。最后, 以甲苯为溶剂, 通过索氏提取器, 去除 PBAT 和改性 PLA/PBAT 共混材料(PLA/PBAT-3)中游离的 PLA 和 PBAT 链段, 提取所形成的双接枝共聚物(PBAT-g-SGE-g-PLA)。

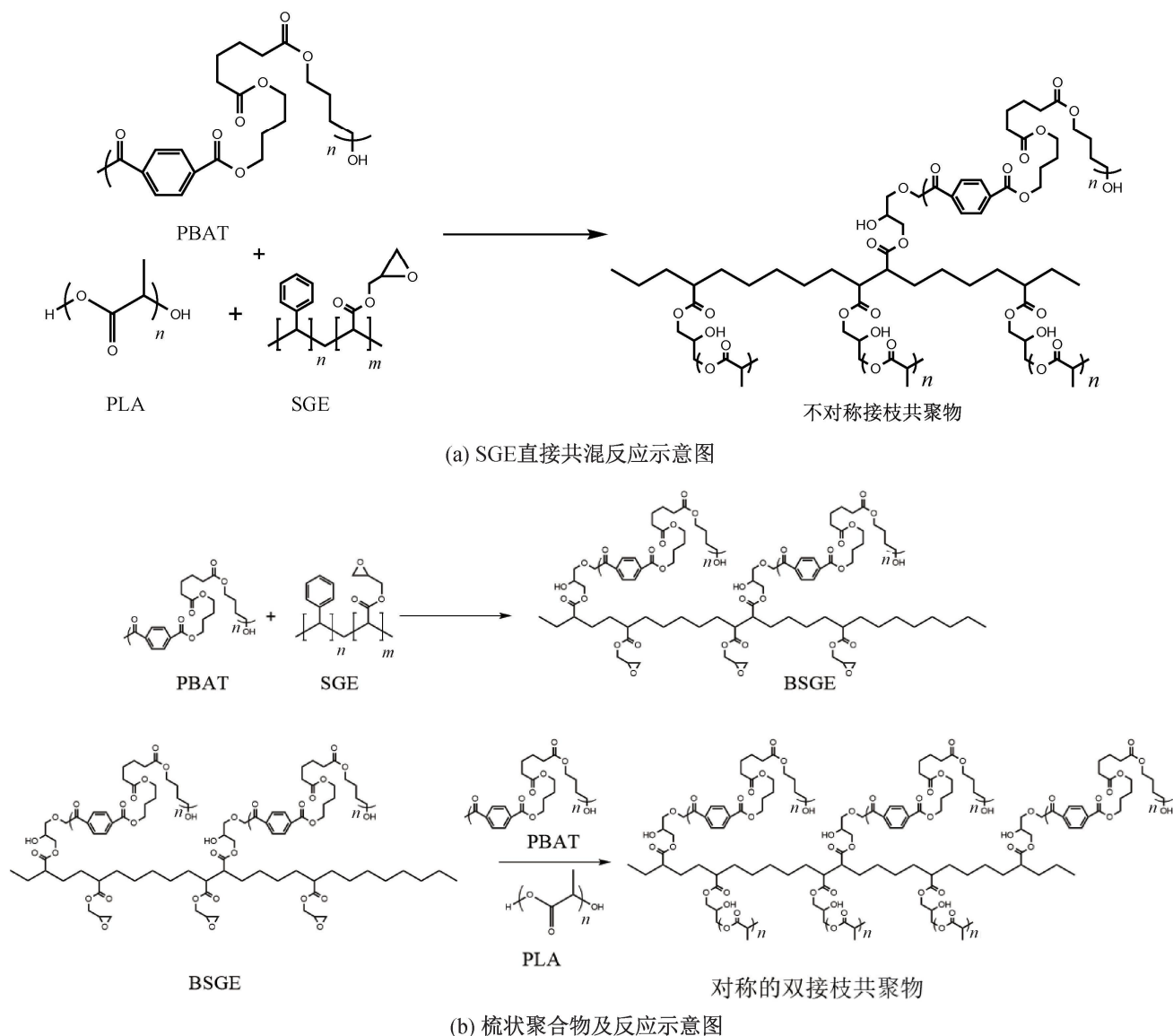


图 1 线性环氧扩链剂增容 PLA/PBAT 共混材料反应示意图

1.3 测试与表征

1.3.1 化学结构

使用傅里叶红外光谱仪测定试样的红外光谱。将样品热压成膜, 采用衰减全反射模式扫

描, 扫描范围 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$, 扫描次数 32 次, 分辨率 4 cm^{-1} 。使用核磁共振波谱仪测定样品核磁共振氢谱, 并使用氘代氯仿(CDCl_3)作为溶剂。

表 1 不同配比的 PLA/PBAT 共混材料试样组分	
试样	各组分质量比($m_{\text{PLA}}:m_{\text{PBAT}}:m_{\text{BSGE}}$)
PLA/PBAT-0	70:30:0
PLA/PBAT-1	70:30:1
PLA/PBAT-2	70:30:2
PLA/PBAT-3	70:30:3
PLA/PBAT-4	70:30:4

1.3.2 微观形貌

采用扫描电子显微镜在 2.0 kV 加速电压下对试样的拉伸断裂面、冲击断裂面和液氮冷冻脆断面等进行形貌表征。

1.3.3 力学性能

采用万能材料试验机测定改性 PLA/PBAT 共混材料的拉伸性能,测试速度为 5 mm/min。根据《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》(GB/T 1040.2—2006)标准,将样品热压成 1BA 型哑铃型样条。采用悬臂冲击试验机,对试样进行缺口冲击试验,样品尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,缺口深度 2 mm。

1.3.4 热性能

使用差示扫描量热仪对样品进行表征,氮气气氛,以 10 ℃/min 升温至 200 ℃,恒温 5 min,再以 10 ℃/min 速率降至 30 ℃,保温 5 min;接着以 10 ℃/min 升温至 200 ℃。

1.3.5 动态流变性能

使用旋转流变仪测定改性 PLA/PBAT 共混材料的流变性能。将样品热压成直径为 25 mm、厚度 1 mm 的圆片,在平行板模式下进行频率扫描,测试温度为 190 ℃,扫描范围为 0.1~100.0 rad/s,固定应变为 1%。

2 结果与分析

2.1 化学结构分析

图 2 为改性 PLA/PBAT 共混材料的红外光谱图,由图 2 可知:908 cm⁻¹ 处的吸收峰为 SGE 分子中的环氧官能团特征峰,726 cm⁻¹ 和 756 cm⁻¹ 处的吸收峰分别为 PBAT 和 PLA 中 C—H 的面内弯曲振动特征峰,1710 cm⁻¹ 和 1750 cm⁻¹ 处的吸收峰归因于 PBAT 和 PLA 中羰基的伸缩振动^[19];在 BSGE 的吸收光谱中,出现了 PBAT 的特征峰和多余的环氧官能团特征峰,并且由 PBAT-g-SGE-g-PLA 吸收光谱可知,PBAT 和 PLA 组分的 C—H 特征峰和羰基的特征峰仍然分别出现在 800~700 cm⁻¹ 和 1800~1700 cm⁻¹ 处,SGE 的环氧官能

团特征峰消失了,这表明 PLA 与 PBAT 成功接枝到了 SGE 的主链上,形成了接枝共聚物。

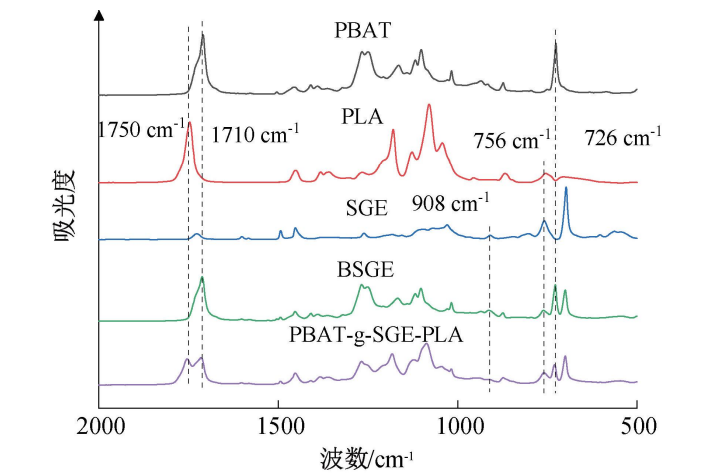


图 2 改性 PLA/PBAT 共混材料的红外光谱图

图 3 为核磁共振氢谱图。图 3 显示:CDCl₃ 的溶剂峰位于 7.26 ppm 处,5.17 ppm 和 1.58 ppm 处的 a 峰与 b 峰分别对应于 PLA 中的甲基和次甲基上氢原子,8.09 ppm 处的 c 峰对应于 PBAT 分子链中苯环上的氢原子,4.43 ppm 与 4.38 ppm 的 d 峰,4.15、4.09 ppm 处的 g 峰,1.97 ppm 处的 e 峰,1.82 ppm 处的 f 峰对应于丁二醇结构单元的氢原子;2.33 ppm 处的 i 峰和 1.66 ppm 处的 h 峰为己二酸中的氢原子;7.13 ppm 和 6.74 ppm 处的宽 j 峰对应于 SGE 苯环上的氢原子;1.54 ppm 和 1.26 ppm 处的 k 峰和 l 峰对应 SGE 亚甲基中的氢原子。以上结果表明 BSGE 在 PLA、PBAT 熔融共混的过程中形成了接枝共聚物。

2.2 热性能分析

图 4 为改性 PLA/PBAT 共混材料的 DSC 曲线。由 4 图可知,共混材料在 150 ℃ 出现吸热峰,这主要是共混材料中 PLA 组分的熔融峰;随着试样中 BSGE 含量的增加,PLA 组分结晶峰面积减小,表明结晶度和结晶能力降低,这主要是由于在共混材料中发生了扩链/支化反应,提高了分子量与分子链缠结密度,阻碍了 PLA 分子链的运动,不利于结晶。

2.3 流变性能分析

图 5 为改性 PLA/PBAT 共混材料的储能模量、损耗模量、复数黏度和频率之间的关系。图 5 (a)显示:与 PLA 试样相比,PLA/PBAT 共混材料的熔体黏度明显提高,并呈现明显的剪切变稀行为,这是由于加入 PBAT 增加了分子链的缠结作用。剪切频率增大时,大分子缠结网络发生解缠结,分子量易发生滑移,高弹形变成分相对减少,分子间范德

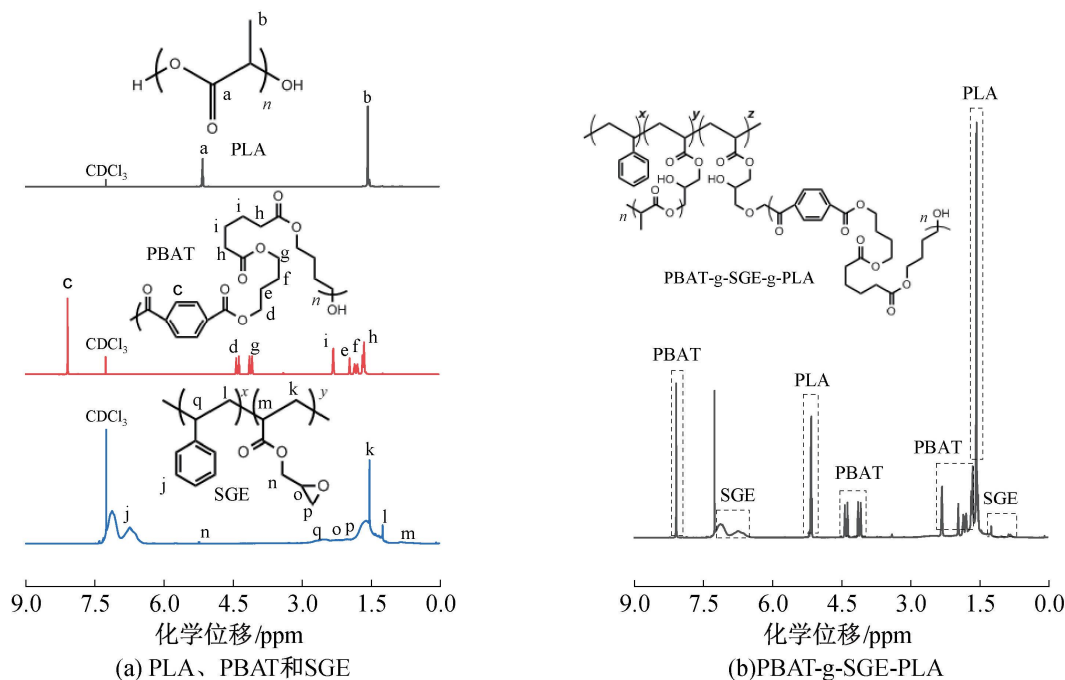


图3 PLA、PBAT、SGE 和 PBAT-g-SGE-g-PLA 的核磁共振氢谱图

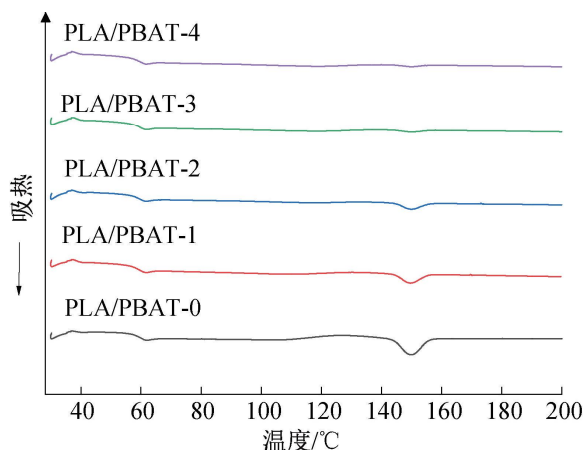


图4 DSC 二次升温曲线

华力减弱,流动阻力减小,导致熔体黏度随剪切频率增大而逐渐降低^[20]。随着BSGE的加入,熔体黏度进一步增大,剪切变稀效应更加显著,这是由于基体中发生了扩链/支化反应,形成的支链大分子间的分子链缠结密度进一步增大,使得复数黏度对剪切速率变化更为敏感。图5(b)~(c)为储能模量和损耗模量与角频率的关系曲线,随着BSGE的添加量的增加,改性PLA/PBAT共混材料的储能模量和损耗模量均呈增大趋势,这是因为共混材料中发生支化反应形成的双接枝共聚物,分子量增大,分子链支化度增加、柔性降低、缠结密度增加,降低了分子链的运动能力^[21-22]。图5(d)为复数黏度的虚部与实部的Cole-Cole关系曲线,PLA和PBAT的Cole-Cole曲线呈现较好的半圆形,这表明聚合物材料在熔体状态下无宏观相分离现象^[23-24],PLA/PBAT-0试样的Cole-Cole曲线出现明显的拖尾,这表明共混材料出现相分离。BSGE增容改性PLA/PBAT共混材料试样的Cole-Cole曲线后段呈线性形状,

显示了组分共连续结构的特征^[13]。由图5(e)损耗模量和储能模量的Han曲线可知,随着BSGE的添加,共混材料的Han曲线的末端区逐渐呈现出线性关系,这是均相高分子体系的流变行为^[25],进一步说明了BSGE的加入促使改善了PLA和PBAT的界面相容性。

2.4 微观形貌分析

图6为改性PLA/PBAT共混材料断面形貌图。由图6可知:未改性的PLA/PBAT共混材料(PLA/PBAT-0)试样呈现出典型的海-岛结构,球状PBAT组分相分散于PLA基体中,PBAT相区尺寸最大约为3 μm,两相界面清晰,存在明显的相分离,这表明试样PLA和PBAT组分具有不相容性;BSGE增容改性PLA/PBAT共混材料中PBAT的相区尺寸显著细化,且PLA和PBAT两相界面模糊,或无明显界面特征,这表明BSGE显示出了良好的增容效果,主要是由于BSGE与PLA、PBAT形成的双接枝共聚物^[14],可富集在相界面,降低表面张力。

分析SGE和BSGE改性对PLA/PBAT共混材料微观形貌的影响,结果如图7所示。图7表明:与未改性PLA/PBAT共混材料相比,SGE改性PLA/PBAT共混材料其PBAT组分相区尺寸得到减小,但仍呈现海-岛结构;BSGE改性PLA/PBAT共混材料(PLA/PBAT-3)则呈现共连续结构,这是由于BSGE增容改性PLA/PBAT共混材料过程中形成了接枝共聚物,更多地存在两相界面处,促使共混体系呈现良好的增容效果^[14,19,26],这与材料Cole-Cole曲线和Han曲线的结果相一致。

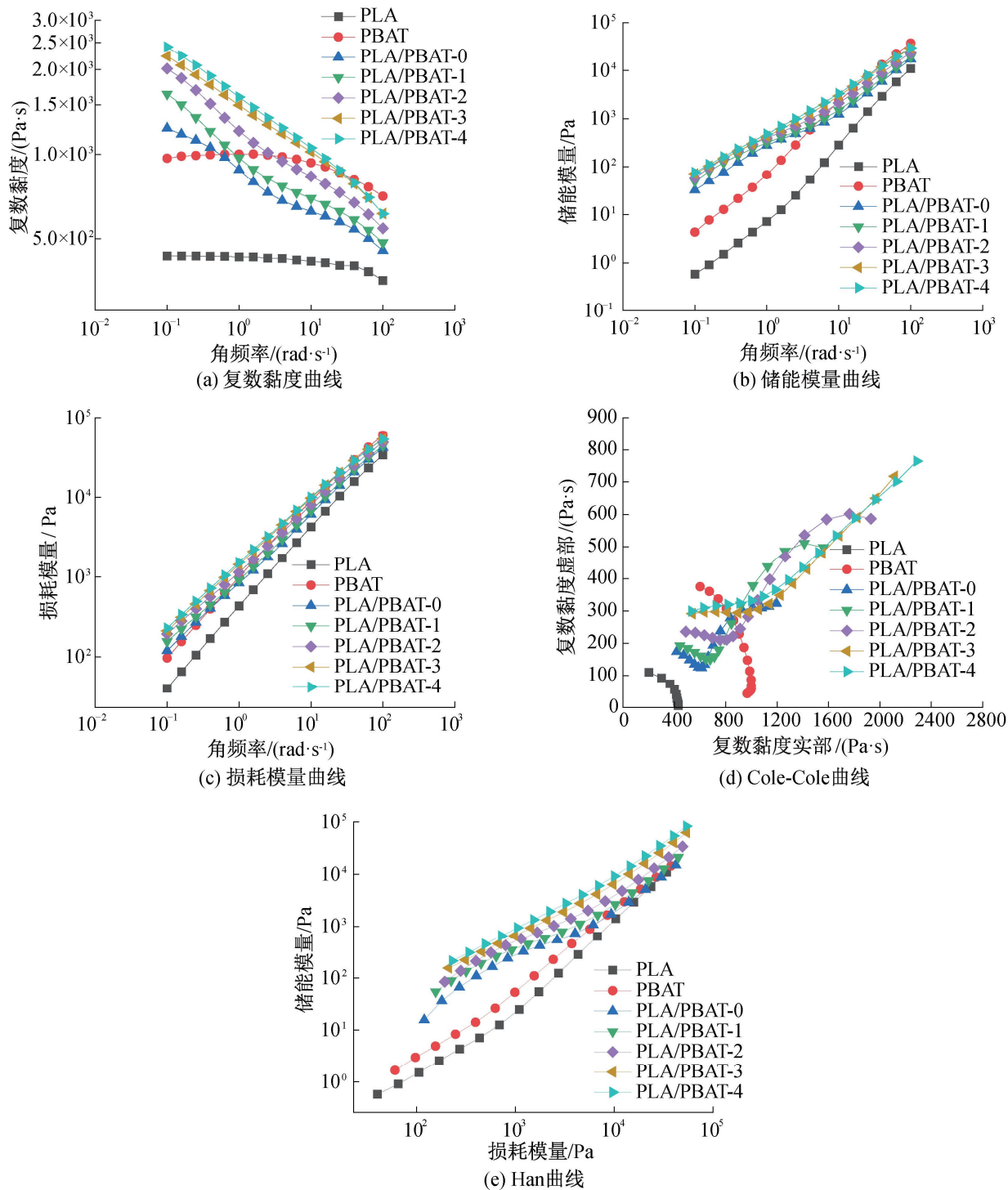


图 5 改性 PLA/PBAT 共混材料的流变性能曲线

2.5 力学性能分析

图 8 为改性 PLA/PBAT 共混材料的应力-应变曲线和冲击性能,具体数据详见表 2。从图 8 和表 2 可知:纯 PLA 试样的断裂伸长率和冲击强度分别为 3.7%和 2.3 kJ/m²,呈现较为明显的脆性。PLA/PBAT-0 的断裂伸长率和冲击强度分别为 41.6%和 7.3 kJ/m²,与纯 PLA 试样相比,体现了一定的增韧效果,但效果并不理想。随着 BSGE 的加入,PLA/PBAT 共混材料的力学性能得到有效提高,其中 PLA/PBAT-3 的断裂伸长率和冲击强度达到最大,分别为 346.2%和 35.7 kJ/m²,这主要是共混材料体系中形成的双接枝共聚物提高了共混材料的相容

性,有效提高了材料的韧性特性。过量的相容剂造成了共混材料力学性能的降低,这是由于过度支化/扩链反应,限制了分子链的滑移,共混材料的塑性变形行为受到限制。

2.6 增韧机理分析

为了进一步研究 BSGE 对共混材料体系的增韧机理,对共混材料的拉伸断裂面与冲击断裂面进行了分析,PLA 和 PLA/PBAT 共混材料拉伸断裂面的微观形貌如图 9 所示。图 9 显示:PLA 的断裂面光滑且平整,表现出典型的脆性断裂行为,由于较弱的界面结合力,PLA/PBAT-0 的断裂面上出现大量的 PBAT 被拉出后留下的空隙;BSGE 增容改性

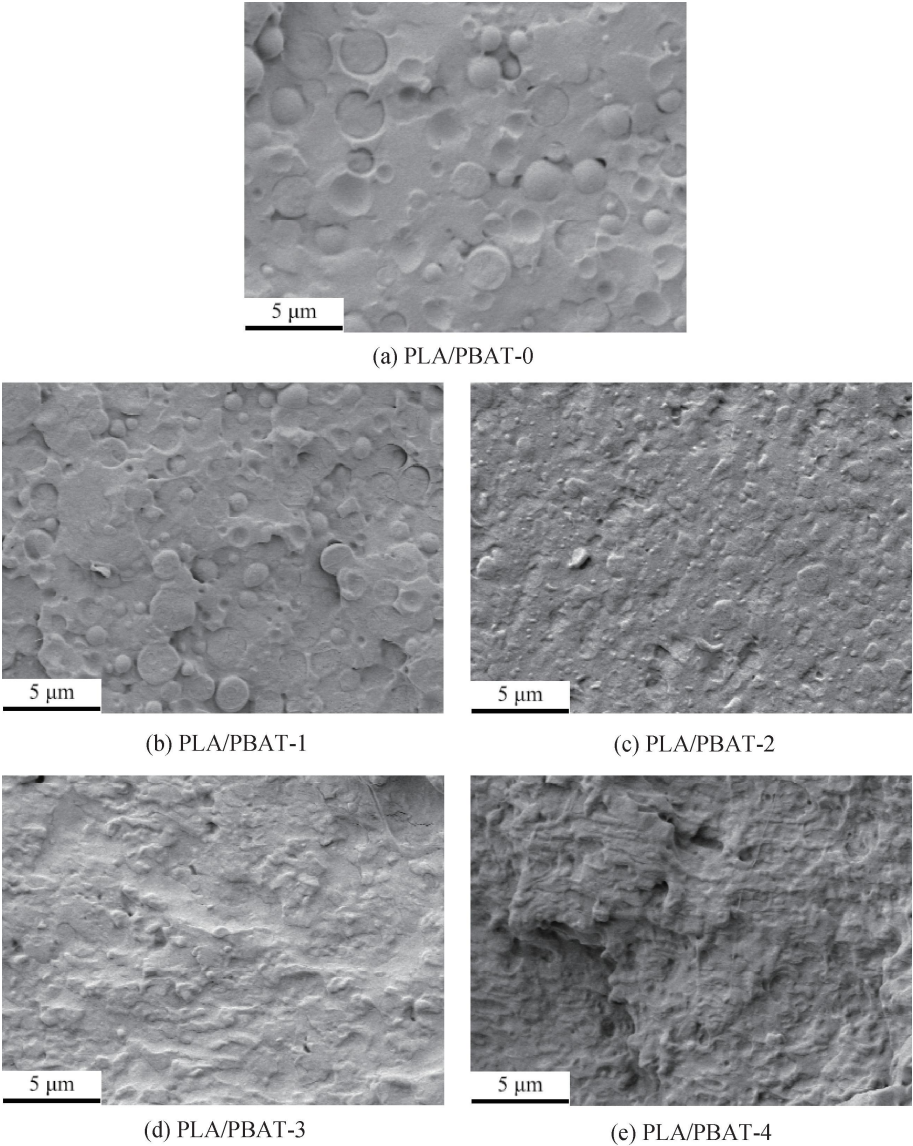


图 6 PLA/PBAT 共混材料微观形貌图

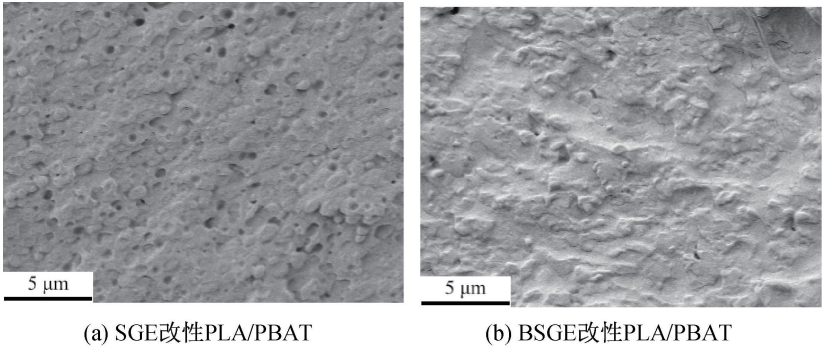


图 7 不同增容剂改性 PLA/PBAT 共混材料微观形貌图

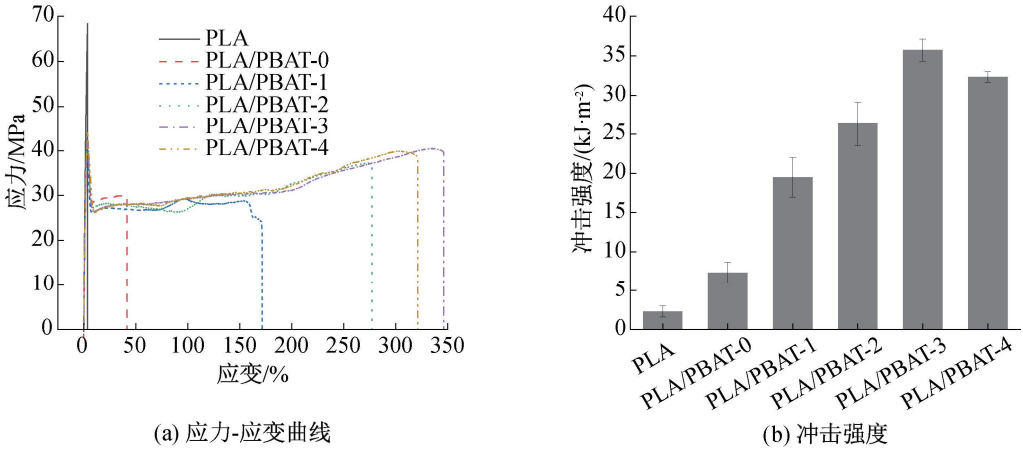


图 8 改性 PLA/PBAT 共混材料的应力-应变曲线和冲击强度

表 2 改性 PLA/PBAT 共混材料的冲击强度和断裂伸长率

试样	冲击强度/(kJ·m ⁻²)	断裂伸长率/%
PLA	2.3	3.7
PLA/PBAT-0	7.3	41.6
PLA/PBAT-1	19.5	171.4
PLA/PBAT-2	26.3	277.2
PLA/PBAT-3	35.7	346.2
PLA/PBAT-4	32.3	321.2

的 PLA/PBAT 共混材料的拉伸断裂面呈现出纤维状形貌,在拉伸过程中基体发生了强烈的拉伸形变^[10,27]。

图 10 为 PLA 和 PLA/PBAT 共混材料冲击断裂面的微观形貌。图 10(a)可见:与拉伸断裂的情况相似,PLA 光滑的冲击断裂面也表现出了脆性断裂行为。图 10(b)为 PLA/PBAT-0 的冲击断裂面,

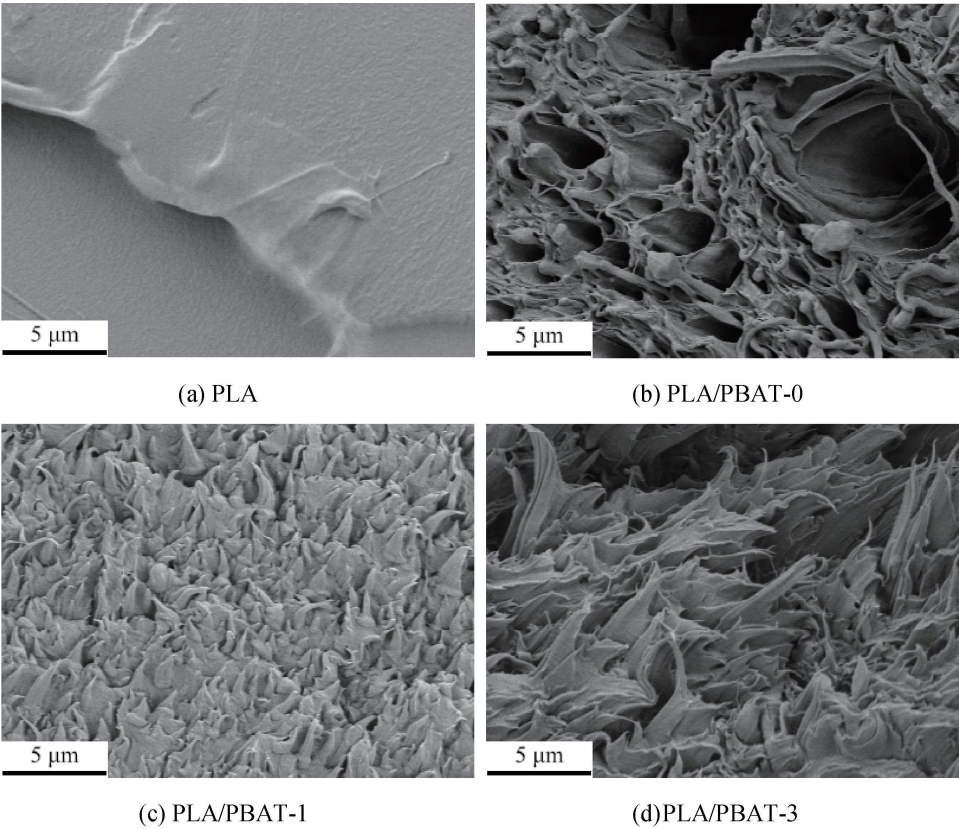


图 9 PLA/PBAT 共混材料的拉伸断面微观形貌图

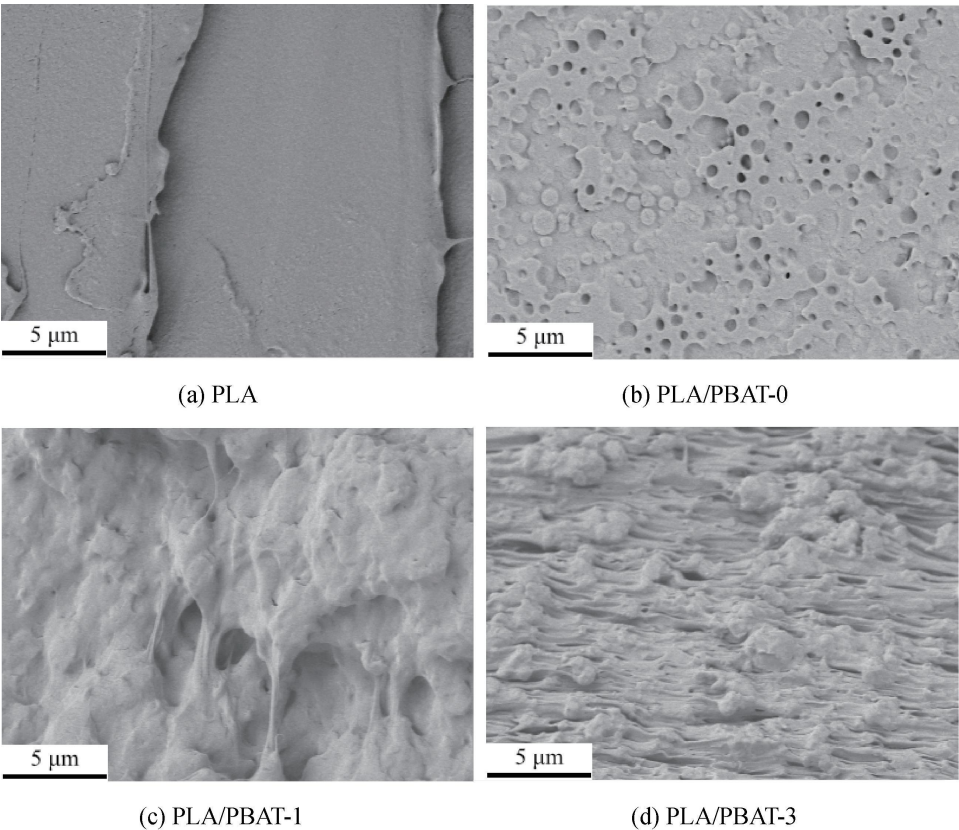


图 10 PLA/PBAT 共混材料的冲击断裂面的微观形貌图

由于 PLA 和 PBAT 较弱的界面结合力,分散相 PBAT 与连续相 PLA 存在着较为明显的界面,在断裂面上形成了海-岛结构;经 BSGE 增容改性的共混材料,冲击断裂面未发生界面脱黏现象,并且在断面上出现了明显的塑性形变^[13,27-28]。综上所述,采用 BSGE 增容改性,有效提高了共混材料相界面之间的结合力,促进了相区结构的转变;当共混材料受到冲击时,应力可以有效地从 PLA 相传递到 PBAT 相,并产生明显的屈服行为和塑性形变,充分发挥 PBAT 增韧的效果。

3 结 论

为改善 PLA/PBAT 体系的相容性,本文采用反应性接枝法制备了 BSGE 反应性梳状共聚物,将其作为增容剂与 PLA、PBAT 共混,制备得到增容改性 PLA/PBAT 共混材料,分析了 BSGE 对 PLA/PBAT 共混体系结构和性能的影响,主要结论如下:

a)BSGE 增容剂在共混过程中发生支化反应形成双接枝共聚物,与 PLA 和 PBAT 组分相发生缠结,使共混材料的相结构由海-岛结构转变为共连续结构的,有效提高了组分间的界面结合力,使应力得以效传递应。

b)BSGE 的加入影响了共混材料的熔体流变行为,复数黏度和模量得到提高。Cole-Cole 曲线和 Han 曲线分别呈现出共连续结构和均相高分子体系的流变特性。

c)BSGE 有效提高 PLA/PBAT 共混材料的力学性能。当 BSGE 增容剂的质量分数达到 3%时,改性 PLA/PBAT 共混材料的断裂伸长率和冲击强度均达到最佳,分别为 346.2%和 35.7 kJ/m²。

参考文献:

- [1] Guo C, Guo H. Progress in the degradability of biodegradable film materials for packaging[J]. *Membranes*, 2022, 12(5): 500.
- [2] Trivedi A K, Gupta M K, Singh H. PLA based biocomposites for sustainable products: A review[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, 6(4): 382-395.
- [3] Lyshtva P, Voronova V, Barbir J, et al. Degradation of a poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) compound in different environments[J]. *Heliyon*, 2024, 10(3): 24770.
- [4] Catherine M C, Massanet J, Guwy A, et al. PHA from acetic acid: Manipulating microbial production of polyhydroxyalkanoates for use in steel coatings [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2024, 25: 101769.
- [5] Moustafa H, El N, Abou A I, et al. PLA/PBAT bionanocomposites with antimicrobial natural rosin for green packaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(23): 20132-20141.
- [6] Aversa C, Barletta M, Cappiello G, et al. Compatibilization strategies and analysis of morphological features of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/poly(lactic acid) PLA blends: A state-of-art review [J]. *European Polymer Journal*, 2022, 173: 111304.
- [7] Su S. Prediction of the miscibility of PBAT/PLA blends[J]. *Polymers*, 2021, 13(14): 2339.
- [8] Nofar M, Heuzey M C, Carreau P J, et al. Effects of nanoclay and its localization on the morphology stabilization of PLA/PBAT blends under shear flow[J]. *Polymer*, 2016, 98: 353-364.
- [9] Mohammadi M, Heuzey M C, Carreau P J, et al. Interfacial localization of CNCs in PLA/PBAT blends and its effect on rheological, thermal, and mechanical properties[J]. *Polymer*, 2021, 233: 124229.
- [10] Xu P, Zhang C, Tan S, et al. Super-toughed polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends in-situ compatibilized by poly(glycidyl methacrylate) with different molecular weight[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 205: 110149.
- [11] 毛帅, 龚佳荣, 孙文涛, 等. 异佛尔酮二异氰酸酯反应增容聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯/聚乳酸生物降解阻隔膜的结构与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(8): 148-155.
- [12] Dammak M, Fourati Y, Tarrés Q, et al. Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 144: 112061.
- [13] Chen X, Zeng Z, Ju Y, et al. Design of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength via interfacial compatibilization and dynamic vulcanization [J]. *Polymer*, 2023, 266: 125620.
- [14] Wei B, Lin Q, Zheng X, et al. Reactive splicing compatibilization of immiscible polymer blends: Compatibilizer synthesis in the melt state and compatibilizer architecture effects [J]. *Polymer*, 2019, 185: 121952.
- [15] Jeon H K, Zhang J, Macosko C W. Premade vs. reactively formed compatibilizers for PMMA/PS melt blends [J]. *Polymer*, 2005, 46(26): 12422-12429.
- [16] Inoue T, Weber M. Pull-out of copolymer in situ-formed during reactive blending: Effect of the copolymer architecture [J]. *Polymer*, 2000, 41(18): 6907-6912.
- [17] Chen D, Wang H, Li Y. Reactive compatibilization: Formation of double-grafted copolymers by in situ binary grafting and their compatibilization effect [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(38): 33091-33099.
- [18] Wang H, Wei B, Gu X, et al. Determining the optimal molecular architecture for reactive splicing compatibilization: Toward a better understanding of reactive polymer processing [J]. *Polymer*, 2020, 208: 122948.

- [19] Chen J, Rong C, Lin T, et al. Stable co-continuous PLA/PBAT blends compatibilized by Interfacial stereocomplex crystallites; Toward full biodegradable polymer blends with simultaneously enhanced mechanical properties and crystallization rates [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(6): 2852-2861.
- [20] 郑强. 高分子流变学[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 57-62.
- [21] Wang X, Peng S, Chen H, 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: 107028.
- [22] Pinheiro I F, Ferreira F V, Souza D H S, et al. Mechanical, rheological and degradation properties of PBAT nanocomposites reinforced by functionalized cellulose nanocrystals [J]. *European Polymer Journal*, 2017, 97: 356-365.
- [23] 赵健雄, 何和智, 杨以科, 等. PLA/PPCU 全降解复合材料的制备与性能[J]. *塑料*, 2023, 52(6): 76-81.
- [24] 易著武, 刘跃军, 刘小超, 等. 乙烯-乙烯醇共聚物/尼龙 6 复合材料的加工流变性能[J]. *材料工程*, 2021, 49(8): 145-152.
- [25] 郑强, 杨碧波, 吴刚, 等. 多组分高分子体系动态流变学研究[J]. *高等学校化学学报*, 1999, 20(9): 1483-1490.
- [26] Hong J, Zhang J, Cao X, et al. Designing of reactive micro-crosslinked PBAT as the efficient biodegradable toughener for PLLA[J]. *Polymer*, 2023, 282: 126167.
- [27] Gu Z, Zhang J, 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 stereocomplex crystallites during melt blending [J]. *Polymer*, 2022, 262: 125454.
- [28] Cai K, Liu X, Ma X, et al. Preparation of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength by dynamic vulcanization process[J]. *Polymer*, 2024, 291: 126587.

(责任编辑:张会巍)