# 生物基反应型增容剂对PLA/PBAT共混材料性能的影响

黄晓军[1],余静成[1],陈 明[2,3],张 融[2,3],高 尚[2,3],张佰尧[2,3],吕 梅[1,4],丁运生[2,3]*

(1.安徽尚纬电缆有限公司,安徽 芜湖 238339;2.合肥工业大学化学与化工学院,安徽 合肥 230009;3.先进功能材料与器件安徽省重点实验室,安徽 合肥 230009;4.合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 聚乳酸(PLA)具有良好的生物相容性和生物可降解性,但其韧性和阻隔性能仍需要提升。以天然蓖麻油的衍生物蓖麻油三缩水甘油醚(GECO)作为反应型增容剂,通过熔融共混的方法引入聚乳酸/聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯(PLA/PBAT)共混材料中。应用热重分析仪、差示扫描量热仪、电子万能试验机、冷场发射扫描电子显微镜、水蒸气透过率分析仪等研究GECO含量对PLA/PBAT结构与性能的影响。结果表明:GECO可以增强PLA与聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)两者间的相互作用,提高分子链段的运动能力,从而改善PLA的结晶能力、共混材料的力学性能以及水蒸气阻隔性能。当GECO的添加量为3 phr时,共混材料的拉伸强度为34.7 MPa,断裂伸长率为282.8%,水蒸气透过率为69.86 g/($m^2$·d)。经GECO改性后的PLA/PBAT共混材料性能有明显提升。研究可为PLA在线缆、包装材料中的应用提供实验依据。

**关键词:** 聚乳酸;蓖麻油三缩水甘油醚;熔融共混;增容剂;界面增容;阻隔性能

**中图分类号:** TQ323.4;TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3360(2026)08-0138-06

**DOI:** 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.024

## Effect of Bio-based Reactive Compatibilizer on Properties of PLA/PBAT Blends

HUANG Xiaojun[1], YU Jingcheng[1], CHEN Ming[2,3], ZHANG Rong[2,3], GAO Shang[2,3], ZHANG Baiyao[2,3], LÜ Mei[1,4], DING Yunsheng[2,3]*

(1. Anhui Shangwei Cable Co. , Ltd. , Wuhu 238339, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Advanced Functional Materials and Devices, Hefei 230009, China; 4. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Polylactic acid (PLA) has good biocompatibility and biodegradability, but its toughness and barrier properties need to be improved. The derivative of natural castor oil, castor oil diglycidyl ether (GECO), was introduced as a reactive compatibilizer into polylactic acid/poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) (PLA/PBAT) blends by melt blending. The effects of GECO content on the structure and properties of PLA/PBAT were investigated by thermogravimetric analyzer, differential scanning calorimeter, electron universal testing machine, cold field emission scanning electron microscope, and water vapor transmission rate analyzer. The results demonstrated that GECO could enhance the interaction between PLA and poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) (PBAT) and promote the crystallization of PLA by enhancing the mobility of molecular chains, so the mechanical properties and water vapor barrier properties of PLA/PBAT were also improved. When the content of GECO was 3 phr in the PLA/PBAT blend, the tensile strength of the blend was 34.7 MPa, the elongation at break was 282.8%, and the water vapor permeability was 69.86 g/($m^2$·d). The performance of the GECO-modified PLA/PBAT blend shows significant improvement. The study provides an experimental basis for the application of PLA in cable and packaging materials.

**Keywords:** PLA; GECO; Melt blending; Compatibilizer; Interfacial compatibilization; Barrier property

收稿日期Submitted date 2025-08-21;修回日期Revised date 2025-09-15;录用日期Accepted date 2025-10-13

*联系人,dingys@hfut.edu.cn

引用本文:黄晓军,余静成,陈明,等.生物基反应型增容剂对PLA/PBAT共混材料性能的影响[J].塑料科技,2026,54(8):138-143.

Citation: HUANG X J, YU J C, CHEN M, et al. Effect of bio-based reactive compatibilizer on properties of PLA/PBAT blends[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 138-143.

聚乳酸(PLA)是典型的环境友好型高分子材料[1-3],具备良好的绝缘性能和生物相容性,在绿色生物基电缆材料和高性能环境友好包装材料等领域展现出良好的开发潜力与应用前景[4-5]。然而,PLA固有的脆性大、结晶速率慢、阻隔性能差等缺点限制其在线缆及包装材料领域的应用[6-8]。与化学接枝、嵌段共聚等分子结构设计策略对比,共混改性凭借其工艺便捷性与性能调控效率优势,成为PLA高性能化改性的优选路径[9-11]。但简单共混会因相分离而产生界面剥离,进而导致PLA基共混材料性能劣化[12-14]。SUN等[15]分别制备低分子量和高分子量的PLA-PBAT-PLA嵌段共聚物CP1和CP2,用作聚乳酸/聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯(PLA/PBAT)共混体系的增容剂,显著提高PLA/PBAT共混材料的断裂伸长率。ZHAN等[16]通过熔融共混将一种环氧树脂链延长剂(EE)引入PLA/PBAT共混体系,制备高强高韧的PLA/PBAT/EE共混材料。结果表明:当EE质量分数为2.5%时,PLA/PBAT复合材料在强度和韧性之间取得平衡。

蓖麻油三缩水甘油醚(GECO)是天然蓖麻油的衍生物,其生物基属性与PLA/PBAT共混材料的可降解特性契合,兼具多环氧官能团和长脂肪链结构,在保证与PLA/PBAT共混材料良好相容性的同时,还可以通过环氧基团与PLA及PBAT形成界面交联结构,进一步提升共混材料的性能。本研究利用生物基GECO作为原料,通过熔融共混法制备PLA/PBAT/GECO共混材料,考察GECO对共混材料结构与性能的影响,为PLA等生物基线缆材料与包装材料的开发与应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PLA,4032D,美国Nature Works公司;PBAT,FBX7011,德国BASF公司;GECO,分析纯,武汉拉那白医药化工有限公司。

### 1.2 仪器与设备

混炼式转矩流变仪,RM-200C,哈尔滨哈普电气技术有限责任公司;真空平板硫化机,XH-406C,东莞锡华检测仪器有限公司;橡胶冲片机,OM25,东莞市欧美奥兰检测设备有限公司;傅里叶红外光谱仪(FTIR),Nicolet 6700,美国Thermo Fisher公司;热重分析仪(TG),Q500,美国TA仪器公司;差示扫描量热仪(DSC),Q2000,美国TA仪器公司;缺口制样机,QYJ1251,MTS工业系统(中国)有限公司;电子万能试验机,CMT4304,MTS工业系统(中国)有限公司;摆锤式冲击试验机,ZBC1000,MTS系统公司;冷场发射扫描电子显微镜(SEM),SU8020,日本株式会社日立制作所;水蒸气透过率分析仪,AQUATRAN3/38,美国MOCON公司;接触角测量仪,OCA20,德国Data Physics仪器公司。

### 1.3 样品制备

表1为PLA/PBAT/GECO共混材料的配方。将原料PLA、PBAT和GECO置于60 ℃的真空干燥箱中进行12 h预处理,以消除水分干扰。将干燥后的原料按照配方称料并混合均匀。在180 ℃、50 r/min条件下持续剪切混炼6 min,将原料缓慢加入转矩流变仪中实施熔融共混工艺,将共混后的物料剪切成粒。随后,将复合母粒二次真空干燥后转移至平板硫化机中进行模压成型,设定工艺参数为:模温190 ℃、压力5 MPa、预压时间1 min、保压时间5 min,制备厚度均一的片材。最后,将制得的板材或薄膜通过冲片机裁制成测试要求的样条,所有样品均在恒温恒湿力学实验室中储存24 h后进行性能表征。

表1 PLA/PBAT/GECO共混材料的配方

Tab.1 Formula of PLA/PBAT/GECO blends 单位:phr

| 样品 | 添加量 | | |
|---|---|---|---|
| | PLA | PBAT | GECO |
| PLA/PBAT | 70 | 30 | 0 |
| PLA/PBAT/1G | 70 | 30 | 1 |
| PLA/PBAT/3G | 70 | 30 | 3 |
| PLA/PBAT/5G | 70 | 30 | 5 |
| PLA/PBAT/7G | 70 | 30 | 7 |
| PLA/PBAT/9G | 70 | 30 | 9 |

### 1.4 性能测试与表征

FTIR测试:全反射法测试,光谱扫描范围覆盖4 000~5 00 $cm^{-1}$,光谱分辨率4 $cm^{-1}$,扫描次数32次。样品直接置于检测窗口,通过压力探头确保材料与衰减全反射附件形成稳定接触,每个样品采集时间约1 min。

TG测试:利用热重分析仪在$N_2$气氛下以10 ℃/min的速率从室温升至800 ℃,氮气流量控制在25 mL/min左右。

DSC测试:在$N_2$氛围下,流量控制在25 mL/min左右,从初始40 ℃以10 ℃/min线性升温至200 ℃,维持5 min;系统切换至降温模式,从200 ℃以10 ℃/min线性降温至-60 ℃,维持2 min;再二次升温,从-60 ℃以10 ℃/min线性升温至200 ℃。

样品结晶度($X_c$)的计算公式为:

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^{\circ} w_{PLA}}\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:$X_c$为结晶度,%;$\Delta H_m$为PLA样品实测熔融焓(通过DSC在二次升温曲线中积分熔融峰面积获得),J/g;$\Delta H_m^{\circ}$为完全结晶状态PLA理论熔融焓,取93.7 J/g;$w_{PLA}$为共混材料中PLA的质量分数,%。

SEM测试:样品测试前进行喷金处理,加速电压5 kV,电流10 μA。

力学性能测试:拉伸强度按照GB/T 2951.11—2008进行测试,样品为5A型标准样条,拉伸速度5 mm/min。冲击强度测试按ISO 180:2023进行测试,试样在恒温室中25 ℃恒温24 h以上,以消除内应力对测试过程和结果的影响。

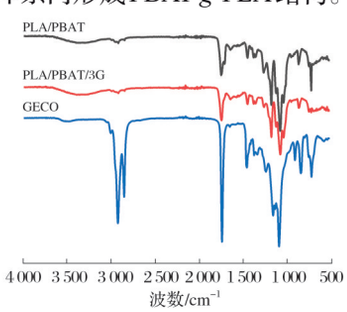
阻隔性能测试:阻隔性能按照GB/T 1037—2021进行测试,测试温度37.8 ℃,相对湿度90%。

接触角测试：将2.0 μL去离子水滴在样品光滑的表面，每个样品取三处表面(间隔≥5 mm)测量，取平均值。

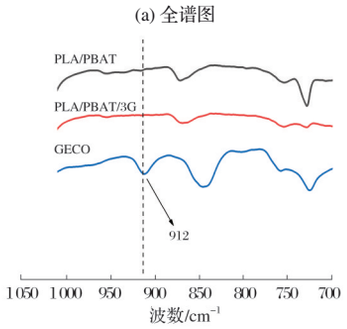
## 2 结果与讨论

### 2.1 GECO及PLA/PBAT共混材料的FTIR分析

图1为GECO、PLA/PBAT及PLA/PBAT/3G的FTIR谱图。从图1可以看出，PLA/PBAT和PLA/PBAT/3G共混材料在1 710 $cm^{-1}$和1 754 $cm^{-1}$处为典型酯羰基(C═O)伸缩振动峰，而GECO在912 $cm^{-1}$处出现显著吸收峰，对应环氧基团中C—O键的对称伸缩振动，该特征峰可作为环氧活性基团的识别区。同时，在PLA/PBAT/3G增容体系中未检测到与GECO中相似的环氧基团特征峰，表明熔融共混过程中GECO环氧基团已完全参与反应。由此可知，GECO的环氧基团在熔融共混过程的高温剪切作用下可以与PLA和PBAT分子链末端的羧基(—COOH)发生原位反应，在共混体系内形成PBAT-*g*-PLA结构。




(a) 全谱图



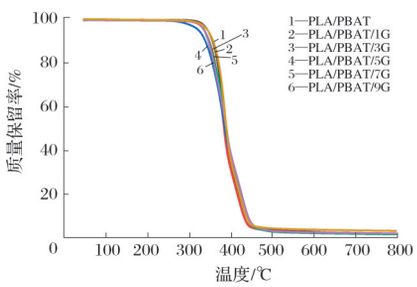

(b) 局部放大谱图

图1 GECO、PLA/PBAT及PLA/PBAT/3G的FTIR谱图

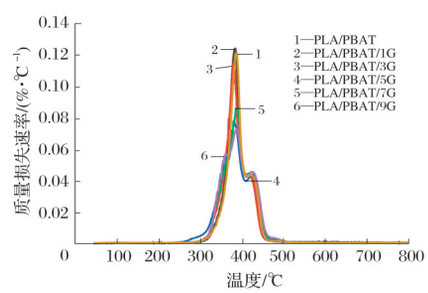
Fig.1 FTIR spectra of GECO, PLA/PBAT and PLA/PBAT/3G

### 2.2 PLA/PBAT/GECO共混材料的热稳定性

图2为PLA/PBAT/GECO共混材料的TG和DTG曲线。表2为PLA/PBAT/GECO共混材料的TG数据。从图2a可以看出，未改性的PLA/PBAT共混材料的热稳定性较好，其质量损失为5%时的初始热分解温度($t_{5\%}$)为341.91 ℃，最大热分解温度($t_{max}$)为378.95 ℃。随着GECO添加量的增加，PLA/PBAT/GECO共混材料的$t_{5\%}$呈现先降低后升高的趋势。当GECO添加量为5 phr时，PLA/PBAT/5G共混材料的热稳定性最差，其$t_{5\%}$下降至320.34 ℃，$t_{max}$下降至375.47 ℃，这是GECO与聚合物端基反应生成的PBAT-*g*-PLA嵌段共聚物优先分解所致。随着GECO添加量增至9 phr，共混材料的$t_{5\%}$回升至333.42 ℃。此时，GECO分子中环氧基团在高温剪切场下形成微交联网络，其三维结构有效抑制热降解过程。综上所述，低含量GECO(≤5 phr)主要发挥反应增容作用，生成的嵌段共聚物PBAT-*g*-PLA虽改善相界面黏接，但其支化点热稳定性相对较差，在升温过程中最先分解；高含量GECO(≥7 phr)则通过环氧基团开环交联构建三维网络，显著提高共混材料间的分子链相互作用以及材料的热稳定性。结果表明：低添加量GECO的共混材料热稳定性稍有劣化，但材料的热稳定性并未显著低于PLA/PBAT共混材料，仍具有较好的热稳定性及加工稳定性。




(a) TG曲线




(b) DTG曲线

图2 PLA/PBAT/GECO共混材料的TG和DTG曲线

Fig.2 TG and DTG curves of PLA/PBAT/GECO blends

表2 PLA/PBAT/GECO共混材料的TG数据

Tab.2 TG data of PLA/PBAT/GECO blends 单位：℃

| 样品 | $t_{5\%}$ | $t_{50\%}$ | $t_{max}$ |
|---|---|---|---|
| PLA/PBAT | 341.91 | 386.80 | 378.95 |
| PLA/PBAT/1G | 341.01 | 383.52 | 380.28 |
| PLA/PBAT/3G | 333.43 | 380.95 | 378.02 |
| PLA/PBAT/5G | 320.34 | 382.89 | 375.47 |
| PLA/PBAT/7G | 334.25 | 387.05 | 380.53 |
| PLA/PBAT/9G | 333.42 | 386.80 | 379.45 |

### 2.3 PLA/PBAT/GECO共混材料的非等温结晶性能

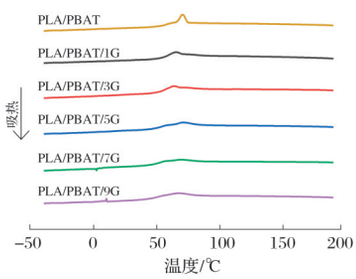
表3为PLA/PBAT/GECO共混材料相应的DSC数据，其中包括结晶温度($t_c$)、结晶焓($\Delta H_c$)、玻璃化转变温度($t_g$)、冷结晶温度($t_{cc}$)、冷却结晶焓($\Delta H_{cc}$)、熔融温度($t_m$)、$\Delta H_m$、$X_c$等。图3为PLA/PBAT/GECO共混材料的DSC曲线。从表3和图3可以看出，低含量GECO的引入可以显著提高材料的$X_c$。当GECO添加量低于5 phr时，共混材料的$X_c$从11.9%提升至21.3%，$t_{cc}$由100.80 ℃显著降至95.30 ℃。这是由于GECO分子增塑效应降低PLA分子链段运动活化能，使PLA分子链段的运动能力提高，从而降低PLA共混材料的$t_{cc}$，提高PLA的结晶能力。随着GECO添加量的进一步增加，PLA/PBAT/GECO共混材料的$X_c$呈下降趋势，从21.3%下降至14.9%。这是因为共混材料界面形成PBAT-*g*-PLA

共聚物，形成交联结构，明显限制分子链的运动，构象调整受阻，导致共混材料的$X_c$有所下降[17-19]。

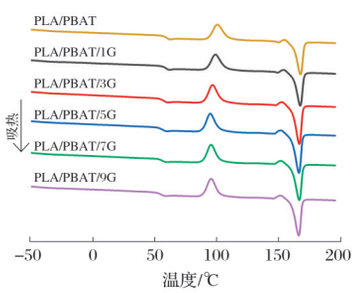
表3 PLA/PBAT/GECO共混材料的DSC数据

Tab.3 DSC data of PLA/PBAT/GECO blends

| 样品 | $t_c$/℃ | $\Delta H_c$/(J·g$^{-1}$) | $t_g$/℃ | $t_{cc}$/℃ | $\Delta H_{cc}$/(J·g$^{-1}$) | $t_m$/℃ | $\Delta H_m$/(J·g$^{-1}$) | $X_c$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PLA/PBAT | 69.84 | 4.48 | 60.40 | 100.84 | 18.25 | 167.73 | 26.12 | 11.9 |
| PLA/PBAT/1G | 64.64 | 8.94 | 60.60 | 99.44 | 18.35 | 167.63 | 27.69 | 14.2 |
| PLA/PBAT/3G | 62.87 | 7.24 | 58.39 | 96.97 | 19.43 | 166.82 | 32.29 | 19.6 |
| PLA/PBAT/5G | 69.90 | 7.46 | 56.44 | 95.30 | 18.54 | 166.54 | 32.54 | 21.3 |
| PLA/PBAT/7G | 67.17 | 7.84 | 57.10 | 95.96 | 20.22 | 166.73 | 31.14 | 16.6 |
| PLA/PBAT/9G | 65.36 | 7.41 | 55.10 | 95.93 | 20.43 | 166.32 | 30.22 | 14.9 |




(a) 降温曲线



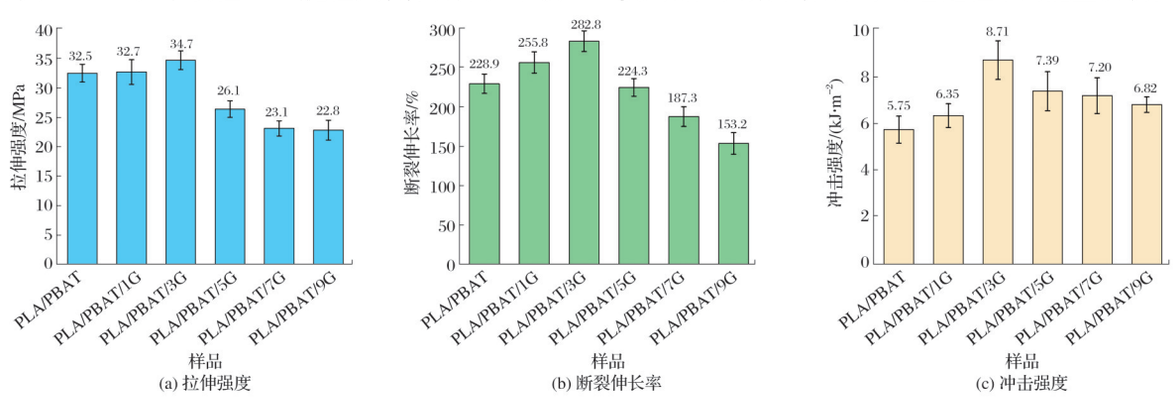

(b) 二次升温曲线

图3 PLA/PBAT/GECO共混材料的DSC曲线

Fig.3 DSC curves of PLA/PBAT/GECO blends

## 2.4 PLA/PBAT/GECO共混材料的力学性能

图4为PLA/PBAT/GECO共混材料的力学性能。从图4a和图4b可以看出，PLA/PBAT的拉伸强度为32.5 MPa，断裂伸长率为228.9%。未改性PLA脆性大，断裂伸长率较低，PBAT的加入明显改善PLA的脆性问题。引入3 phr的GECO后，体系拉伸强度增至34.7 MPa，断裂伸长率跃升至282.8%，比PLA/PBAT分别提高约6.8%和23.5%。共混材料力学性能增强是源于在高温剪切过程中诱导GECO的环氧官能团与PLA/PBAT端基发生原位接枝反应，增强界面处的相互作用，有效抑制相分离，因此共混材料的断裂伸长率得到明显改善。但当GECO添加量进一步增加后，共混材料力学性能下降较为显著。当GECO添加量为9 phr时，材料拉伸强度下降至22.8 MPa，断裂伸长率下降至153.2%。其原因是过量的GECO会倾向于在共混材料中局部聚集，造成拉伸过程中引发应力集中效应，从而使共混材料的韧性下降。从图4c可以看出，相比PLA/PBAT共混材料，PLA/PBAT/GECO共混材料的缺口冲击强度有大幅提高，随着GECO添加量呈现出先升高后降低的趋势。添加3 phr GECO的共混材料缺口冲击强度达到8.71 kJ/m$^2$，比PLA/PBAT提高51%，这得益于接枝物形成的三维交联网络对冲击能量的耗散作用。但当GECO添加量为9 phr时，冲击强度回落至6.82 kJ/m$^2$，表明过量交联限制分子链的滑移变形能力。综上所述，GECO使界面间作用力提高，材料的冲击强度得到增强，GECO塑化效果显著，可以提高共混材料的韧性[20]。然而，GECO添加量过高时，材料的缺口冲击强度降低，GECO的团聚引发局部应力集中，限制了冲击过程中的能量吸收和耗散。




(a) 拉伸强度 (b) 断裂伸长率 (c) 冲击强度

图4 PLA/PBAT/GECO共混体系的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of PLA/PBAT/GECO blends

## 2.5 PLA/PBAT/GECO共混材料的相形态及微观形貌

图5为PLA/PBAT/GECO共混材料脆断面的SEM照片。从图5可以看出，PLA/PBAT呈现出分布不均的“海-岛”结构，其中PLA为连续相，PBAT为分散相，呈现出不同大小的球形颗粒嵌入在基体中，两相界面清晰可见。这是因为PLA与PBAT相容性较差，导致界面黏附力较弱。向

PLA/PBAT共混体系引入GECO后，PBAT分散相的球形颗粒尺寸开始减小。随着GECO添加量的增加，PLA与PBAT之间的相分散状况变好，尤其是当GECO添加量为3 phr时，PBAT颗粒尺寸最小，表明此时相容性最好。这是由于GECO的环氧基团与PLA、PBAT端基反应生成PBAT-*g*-PLA接枝共聚物，使界面结合能提升。综上所述，GECO增强两组分之间的界面相互作用，进而影响分散相PBAT的球形颗粒尺寸，提高PLA与PBAT的相容性。然而，当GECO含量较高时，其自身会产生聚集并诱发PLA和PBAT的二次相分离。这同样解释了后续力学性能变差的原因以及GECO对共混材料阻隔性能的影响。

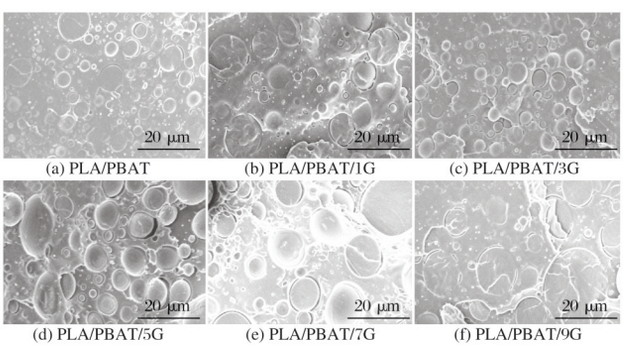



图5 PLA/PBAT/GECO共混材料脆断面的SEM照片(2 500×)
Fig.5 SEM images of brittle fracture surfaces of PLA/PBAT/GECO blends (2 500×)

图6为PLA/PBAT/GECO共混材料拉伸断面的SEM照片。从图6可以看出，未改性PLA/PBAT共混材料呈现粗糙断裂面及粗线状纤维延展结构，呈现典型韧性断裂特征。引入GECO后，断面形貌发生显著转变，相界面形成均匀分布的微裂纹，纤维结构呈现细长状，表明材料韧性的提升。该形貌转变源于GECO的环氧基团发生原位开环反应，显著提升PLA与PBAT的界面作用。动态拉伸过程中，化学键合网络通过分子链滑移与断裂实现能量耗散，增强材料延展性[21]。然而，当GECO添加量超过3 phr时，断面形貌呈现显著劣化，纤维结构向短粗化过渡，过量未反应的环氧基团引发GECO分子自聚集，导致界面应力集中，微纤结构粗化，断裂伸长率下降。

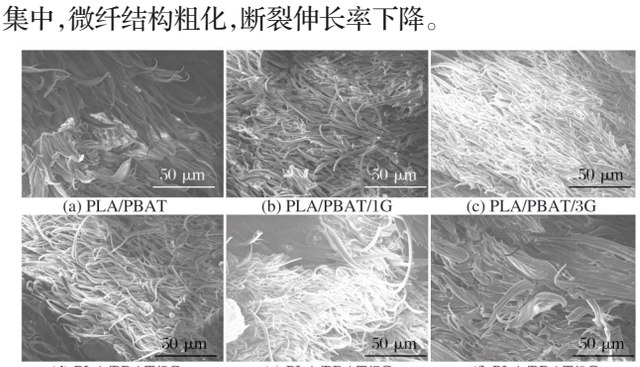



图6 PLA/PBAT/GECO共混材料拉伸断面的SEM照片(1 000×)
Fig.6 SEM images of tensile fracture surfaces of PLA/PBAT/GECO blends (1 000×)

## 2.6 PLA/PBAT/GECO共混材料的疏水性

图7为PLA/PBAT/GECO共混材料的水接触角。从图7可以看出，PLA/PBAT的水接触角为74.2°，表现出典型的亲水特性，这与其分子链中富含酯基极性基团密切相关。引入GECO后，材料表面疏水性显著增强，当GECO添加量增至9 phr时，接触角达到83.4°，较PLA/PBAT样品提升12.4%。这种显著的疏水强化效应可能是因为GECO分子中长链烷基在熔融共混以及加工成型过程中富集于共混材料表层，提高了材料的表面能，形成了疏水屏障。同时，环氧基团与聚合物端基反应构建的交联网络降低表面粗糙度，有效抑制相分离导致的微孔缺陷。此外，DSC结果显示GECO诱导PLA/PBAT结晶度从11.9%提升至21.3%，致密化的晶区结构屏蔽非晶区亲水基团的暴露，材料表面疏水性增强。

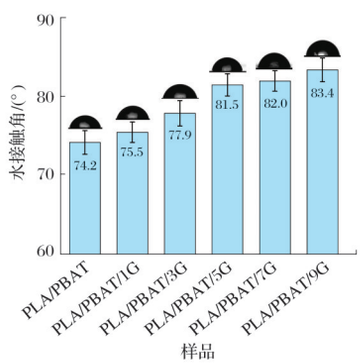



图7 PLA/PBAT/GECO共混材料的水接触角
Fig.7 Water contact angles of PLA/PBAT/GECO blends

## 2.7 PLA/PBAT/GECO共混材料的阻隔性能

图8为PLA/PBAT/GECO共混材料的阻隔性能。

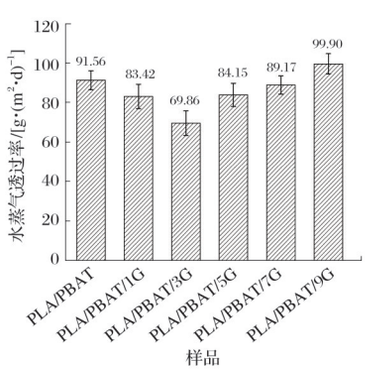



图8 PLA/PBAT/GECO共混材料的阻隔性能
Fig.8 Barrier property of PLA/PBAT/GECO blends

从图8可以看出，PLA/PBAT的水蒸气透过率为91.56 g/(m²·d)，这与酯基极性基团以及相界面微孔缺陷密切相关。向PLA/PBAT共混体系中引入GECO后，PLA/PBAT/3G的水蒸气透过率降低至69.86 g/(m²·d)，相比于PLA/PBAT降低23.7%。这种阻隔强化效应源于GECO的环氧基团与PLA、PBAT端基反应形成界面化学键，抑制了相分离并减少微孔缺陷，致密晶区阻碍水蒸气的扩散路径；GECO长烷基链降低材料的表面能，使水接触角增大，减少表面水吸附，从而使薄膜的水蒸气透过率降低。但当进一步提高GECO添加量时，共混材料的水蒸气透过率会逐渐增加。当GECO添加量为9 phr时，水蒸气透过率反升至

99.90 g/(m²·d)。这与界面结构劣化密切相关，过量添加GECO导致的团聚、相分离使界面交界处空隙增加，这更利于水蒸气的渗透，阻隔性能也因此下降[22-23]。

## 3 结论

将GECO引入PLA/PBAT共混体系，考察GECO添加量对PLA/PBAT共混材料结构和性能的影响。FTIR、DSC结果表明，当GECO添加量≤5 phr时增塑效果显著，可增强PLA链段运动能力并促进分子链的有序堆积，使$X_c$从11.9%提升至21.3%；高含量的GECO在体系内形成交联结构，限制链段运动，降低$X_c$。力学性能与SEM分析表明，PLA/PBAT共混材料呈海岛结构，PBAT分散相尺寸较大且均一性差；GECO的环氧基团与PLA、PBAT端基产生反应，分子链之间相互缠结，增强界面间相互作用力，共混材料的力学性能逐渐增强；但是，高含量的GECO会自身团聚，使PBAT相尺寸变大，共混材料的力学性能逐渐劣化。当GECO添加量为3 phr时，共混材料综合性能较好，其断裂伸长率为282.8%，拉伸强度为34.7 MPa。GECO的引入增大共混材料的疏水性，提高共混材料的阻隔性能。当GECO添加量为3 phr时，水蒸气透过率为69.86 g/(m²·d)。本研究构建基于天然蓖麻油衍生物的绿色改性体系，GECO降解后可有效规避污染环境风险，同步增强PLA/PBAT共混材料的力学性能与阻隔性能。本研究为绿色环保线缆材料及包装材料的应用提供新的思路。

## 参考文献

[1] 辛宇, 纪嘉琦, 王丽, 等. PEI功能化中空介孔二氧化硅掺杂PLA复合膜的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(2): 91-96.

[2] CÁRDENAS-OSCANOA A J, TENE TAYO J L, HUANG C X, et al. Discovering natural fiber-insulation boards and natural adhesives, focused on a polylactic acid (PLA) application: A review[J]. Journal of Natural Fibers, 2024, 21: 2343371.

[3] NAKATSUKA T. Polylactic acid-coated cable[J]. Fujikura Technical Review, 2011, 40: 39-45.

[4] 李科, 周远翔, 张云霄, 等. 相变对聚乳酸空间电荷和直流击穿特性的影响[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 66-72.

[5] ZULIANI A, RAPISARDA M, CHELAZZI D, et al. Synthesis, characterization, and soil burial degradation of biobased polyurethanes [J]. Polymers, 2022, 14(22): 4948.

[6] LI X R, LIN Y, LIU M L, et al. A review of research and application of polylactic acid composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(7): e53477.

[7] JEON H, SON J H, LEE J, et al. Preparation of a nanocellulose/nanochitin coating on a poly(lactic acid) film for improved hydrolysis resistance[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127790.

[8] NOURANY M, MAKAREMY A, BAZRPASH S, et al. Bimodal macroporous 3D scaffolds based on compatibilized PCL and PLA blend using PCL-PEG-PCL block copolymers and cellulose nanocrystals for osteogenic differentiation of hMSCs[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 299: 140149.

[9] STAFFA L H, HUYSECOM A S, BETTINI S H P, et al. Effect of molecular structure of PEG/PCL multiblock copolymers on the morphology and interfacial properties of PLA/PCL blends[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(9): 388.

[10] FERNÁNDEZ-TENA A, OTAEGI I, IRUSTA L, et al. High-impact PLA in compatibilized PLA/PCL blends: Optimization of blend composition and type and content of compatibilizer[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2023, 308(12): 2300213.

[11] LI X G, YANG Q, ZHANG K, et al. Property improvement and compatibilization mechanism of biodegradable polylactic acid/maleic anhydride-based/polypropylene spunbonded nonwoven slices[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134097.

[12] LU B, LEE J, CHOI Y, et al. Effect of radical initiators on the phase structure and rheological properties of PLA/PBAT/multi-walled carbon nanotube composites[J]. Polymer Korea, 2022, 46(5): 701-708.

[13] MING M H, ZHOU Y C, WANG L D, et al. Effect of polycarbodiimide on the structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(9): 371.

[14] CHEN X N, ZENG Z, JU Y L, et al. Design of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength via interfacial compatibilization and dynamic vulcanization[J]. Polymer, 2023, 266: 125620.

[15] SUN Z Q, ZHANG B, BIAN X C, et al. Synergistic effect of PLA-PBAT-PLA tri-block copolymers with two molecular weights as compatibilizers on the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends[J]. RSC Advances, 2015, 5(90): 73842-73849.

[16] ZHAN R, LI X L, ZHENG Y, et al. Fabrication of high-strength and tough PLA/PBAT composites via *in-situ* copolymer formation using an adaptable epoxy extender[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 302: 140530.

[17] MISHRA S, SAHOO R, UNNIKRISHNAN L, et al. Enhanced structural and dielectric behaviour of PVDF-PLA binary polymeric blend system[J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101958.

[18] ZHAO X P, YU J J, LIANG X Y, et al. Crystallization behaviors regulations and mechanical performances enhancement approaches of polylactic acid (PLA) biodegradable materials modified by organic nucleating agents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123581.

[19] NAGARAJAN V, MOHANTY A K, MISRA M. Crystallization behavior and morphology of polylactic acid (PLA) with aromatic sulfonate derivative[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, DOI: 10.1002/app.43673.

[20] DING Y, FENG W T, LU B, et al. PLA-PEG-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the interfacial structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends[J]. Polymer, 2018, 146: 179-187.

[21] LIU W T, WANG Y J, XIANG S, et al. Unveiling the effect of enhanced interfacial compatibility on the mechanical properties of PLA/PBAT blends[J]. Polymer, 2024, 296: 126815.

[22] SAFANDOWSKA M, MAKAREWICZ C, ROZANSKI A, et al. Barrier properties of semicrystalline polylactide: The role of the density of the amorphous regions[J]. Macromolecules, 2022, 55(22): 10077-10089.

[23] XIE Y J, WANG C X, GAO S, et al. Mechanism of improving the mechanical and barrier properties of poly(lactide)/poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(42): e56120.