http://pmse.scu.edu.cn

海因环氧树脂反应性增容聚乳酸复合材料

黄吟秋，闫成宇，江德志，范家鑫，唐龙祥
（合肥工业大学 化学与化工学院，安徽 合肥230009）

摘要：聚乳酸（PLA）作为一种可生物降解材料近年来受到人们的关注，但其固有脆性限制了它的进一步应用，需对其进行增韧改性。热塑性聚氨酯（TPU）是一种高韧性橡胶，可用于PLA的增韧改性，但两者之间相容性较差，增韧效果有限。文中采用反应性相容剂海因环氧树脂（HY-EP），利用HY-EP的环氧基团在熔融共混过程中与PLA和TPU中的羟基或羧基结合，以环氧开环反应形成化学键合，通过强烈的界面作用改善PLA与TPU间的相容性，进而提升力学性能。差示扫描量热分析、热重分析、傅里叶变换红外光谱分析、动态力学热分析、扫描电子显微镜分析等结果表明，复合材料相容性明显提升。当HY-EP的添加量为3phr时，PLA复合材料的冲击强度达到15.08 kJ/m^2，较纯PLA材料提升了近5倍；断裂伸长率最高达到337.56%，同时拉伸强度为50.42 MPa，获得了兼具较高强度与韧性的PLA复合材料。

关键词：聚乳酸；热塑性聚氨酯弹性体；海因环氧树脂；增韧改性；反应性增容
中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）03-0061-08

近年来，全球塑料年消费量高涨，产生了大量废弃塑料，对环境造成了不可估量的严重伤害。为了从根本上解决这一问题，生物降解塑料的应用已成为当前重要的研究课题之一[1]。聚乳酸（PLA）具备极其出色的生物降解能力，同时其力学强度优异，且拥有良好的加工性能，因此成为目前较为热门的研究课题，被誉为最有前途的可持续聚合物之一[2]。PLA经过加工改性后可广泛应用于食品包装等工业领域，具有广阔的应用前景[3]。然而，PLA本身较脆，需要与其他材料复合以提高韧性，因此如何选择合适的增韧及增容材料，使复合材料兼具韧性及强度成为当前研究PLA材料的重要挑战[4]。

聚合物共混能够开发与定制材料的各项性能，是一种经济高效的改性手段[5]。共混物分为混相和非混相2种，混相焓的存在使大多数聚合物表现出非混相的特性[6]。共混物的各项性能与相形态有关，而材料的加工条件、质量比、黏度比、组分之间相互作用等都会对相形态造成影响[7]。改善PLA的韧性可以通过添加增塑剂或与橡胶弹性体共混来实现[8]。材料的增韧效果与组分之间的相互作用有关，因为它主导了聚合物组分之间的应力传递，进而决定复合材料的断裂行为[9]。单纯添加橡胶弹性体可以有效提升PLA的韧性，但并不是极限；通过添加嵌段或接枝共聚物的增容剂可以增加复合材料的界面附着力，减少两相晶格的排斥作用，进一步对复合材料进行增韧[10, 11]。蒋文柔等[10]以聚乳酸接枝马来酸酐（PLA-*g*-MAH）为相容剂，采用熔融法将该相容剂与聚乳酸/聚对苯二甲酸乙二醇酯-1，4-环己烷二甲醇酯（PLA/PETG）进行熔融共混，发现PETG对PLA有一定的增韧作用，PLA/PETG（80/20）共混物中添加3phr PLA-*g*-MAH，可有效提高PLA与PETG间的相容性，进而进一步提高PLA/PETG共混物的冲击韧性。

本文采用环氧值约为0.74的海因环氧树脂

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0239
收稿日期：2023-10-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（62275072）
通讯联系人：唐龙祥，主要从事高分子材料改性研究，E-mail: tanglx@hfut.edu.cn

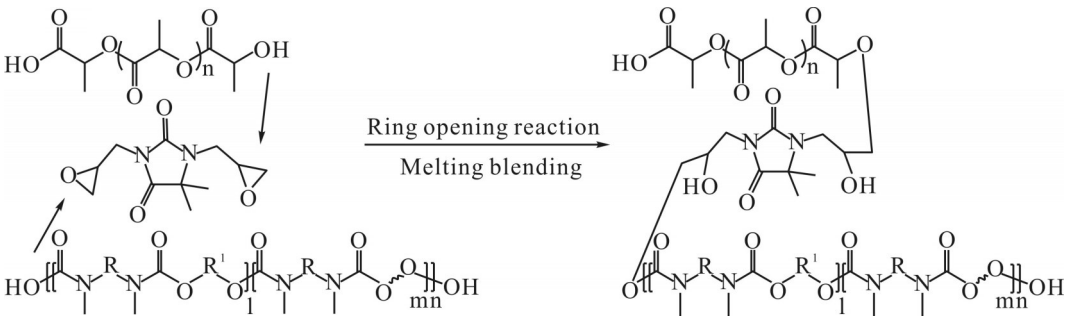


Fig. 1 Predicted reaction mechanisms for PLA/TPU/HY-EP composites

作为PLA与TPU的相容剂，其全称为5, 5-二甲基-1, 3-二(环氧乙烷基甲基)咪唑烷-2, 4-二酮（HY-EP），其中的环氧基团可以与PLA和热塑性聚氨酯（TPU）的羟基/羧基进行环氧开环反应。对比粗略的物理共混，利用化学反应产生的共价键可以有效提高PLA与TPU间的相容性，从而提高PLA复合材料的韧性，反应机理如Fig.1所示。海因环氧树脂中存在两个未共享电子对的叔胺原子，在推电子作用下其具有很强的电负性，通过攻击环氧基团上的碳原子从而引发环氧开环反应。本文通过调整该环氧树脂在复合材料中的比例探究了其对后者相容性和力学性能的影响，为新型增容剂的研究思路提供了新方案。

1 实验部分

1.1 原料与设备

聚乳酸：4032D，上海俱佳塑料胶原料有限公司，密度为1.23 g/cm^3；热塑性聚氨酯：WHT-1570，青岛驰宇轩塑料有限公司，密度为1.20 g/cm^3；海因环氧树脂：MHR-070，荆门市东昕生物科技有限公司，环氧值为0.74。

转矩流变仪：BP-8188型，东莞市宝品精密仪器有限公司；平板硫化机：TH6009型，江苏天惠试验机械有限公司；万能裁样机：TF-2062型，扬州市天发试验机械有限公司；电动缺口制样机：ZL-6025型，东莞市正蓝精密仪器有限公司；电子万能材料试验机：QL-5S型，厦门群隆仪器有限公司；差示扫描量热仪（DSC）：BXT-DSC100L型，上海能共实业有限公司；热重分析仪（TG）：BXT-STA-1250型，上海能共实业有限公司；扫描电子显微镜（SEM）：Gmini-500型，德国蔡司集团；动态力学热分析仪（DMA）：DMA 242E型，广东省华南检测技术有限公司。

1.2 试样制备

实验开始前，将PLA与TPU颗粒放入80 ℃的真空干燥箱中干燥24 h。干燥完成后，将PLA，TPU与HY-EP按不同比例放入190 ℃的转矩流变仪内密炼10 min，转速60 r/min。本文控制PLA与TPU的质量比恒为90:10，分别添加质量分数为0%，1%，2%，3%，4%和5%的HY-EP，按照HY-EP的比例分别命名为PLA/TPU/HY- EP(90/10/0)，PLA/TPU/HY- EP(90/10/1)，PLA/TPU/HY- EP(90/10/2)，PLA/TPU/HY- EP(90/10/3)，PLA/TPU/HY- EP(90/10/3)，PLA/TPU/HY-EP(90/10/4)和PLA/TPU/HY-EP(90/10/5)。密炼后的复合材料通过平板硫化机进行模压成型，将仪器的加热温度设置为200 ℃，最终制备成测试样品。

1.3 测试与表征

1.3.1 *傅里叶变换红外光谱分析*：利用平板硫化机制备的透明薄膜状样品，采用红外衰减全反射（ATR）进行分析。扫描范围400~4000 cm^{-1}，扫描次数32次，光谱分辨率4 cm^{-1}。

1.3.2 *力学性能测试*：制备哑铃型样条，根据国标GB/T528-2009和国标GB/T1843-2008分别进行拉伸测试及抗冲击测试。每个组分选取5根样条进行测试，取平均值。

1.3.3 *差示扫描量热分析*：使用氮气氛围，将米粒大小的样品从室温匀速升至200 ℃，速率为30 ℃/min，保温5 min；接着降温至－70 ℃，保温5 min后升至200 ℃，速率为10 ℃/min，检测样品的熔融、结晶及玻璃化转变温度。

1.3.4 *热失重分析*：使用氮气氛围，将米粒大小的样品从室温匀速升至800 ℃，速率为10 ℃/min，检测高

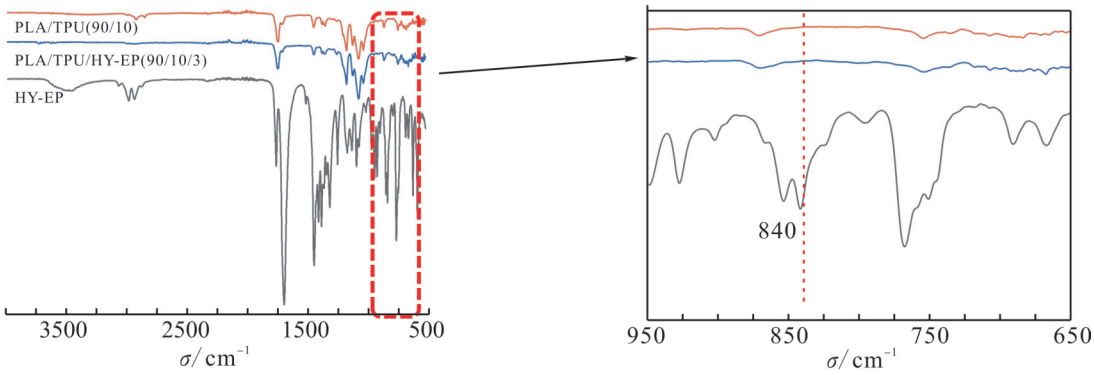


Fig. 2 FT-IR spectra of neat HY-EP and PLA/TPU/HY-EP composites

Tab. 1 Mechanical properties of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites

Samples	Tensile strength /MPa	Elongation at break /%	Notched impact strength /(kJ·m^{-2})
PLA	53.34±1.37	11.11±5.63	3.01±0.24
PLA/TPU/HY-EP(90/10/0)	43.67±3.37	50.21±12.36	6.78±1.36
PLA/TPU/HY-EP(90/10/1)	44.64±2.45	276.84±36.52	9.04±1.66
PLA/TPU/HY-EP(90/10/2)	47.22±4.25	364.92±27.55	14.32±1.48
PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)	50.42±3.52	337.56±23.69	15.08±1.21
PLA/TPU/HY-EP(90/10/4)	44.53±5.22	303.96±31.78	13.57±1.98
PLA/TPU/HY-EP(90/10/5)	42.70±1.30	210.42±1.30	12.06±2.22

温时样品的重量变化。

1.3.5 *动态力学性能测试*:制备 50 mm×10 mm×2 mm 的样品,使用液氮将样品温度控制到 − 50 ℃,后升温至 100 ℃,速率为 3 ℃/min,三点弯曲模式,频率 1 Hz,测试其动态力学性能曲线。

1.3.6 *扫描电子显微镜表征*:通过扫描电子显微镜分析样品的表面形貌。25 kV 加速电压。样品置于液氮中,手动断裂后浸泡甲醇-水溶液 12 h,获得冷冻断裂测试样;利用悬臂梁冲击样品获得常温断裂试样;所有试样均喷金处理后进行观察。

2　结果与讨论

2.1　傅里叶变换红外光谱分析

为了探究 HY-EP 对 PLA/TPU 复合材料的增容作用,判断预期的环氧开环反应是否发生,本文选用纯 HY-EP,PLA/TPU(90/10) 及 PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)3 种样品进行红外 ATR 分析,结果如 Fig.2 所示。如图,纯 HY-EP 在 840 cm^{-1} 左右处存在环氧特征峰,而不含环氧树脂的 PLA/TPU(90/10)在该处无明显峰值,PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)样品在相应位置同样没有特征峰,说明 HY-EP 的加入产生了化学反应,其上的环氧基团经过羧基或羟基发生开环致使特征峰消失,证明 HY-EP 可以在两相之间形成化学键从而对复合材料增容。

2.2　力学性能分析

Fig.3 为 PLA/TPU/HY-EP 复合材料的应力-应变图,Tab.1 列出了其拉伸强度、断裂伸长率及缺口冲击强度等力学参数。纯 PLA 样条不具备韧性,在室温时断裂伸长率仅有 11.11%;加入质量分数 10% 的 TPU 进行粗略的物理共混,其复合材料的断裂伸长率略有提高,达到 50.21%;冲击强度由纯 PLA 的 3.01 kJ/m^2 提升至 6.78 kJ/m^2,提升幅度为 125%;但拉伸强度从原来的 53.34 MPa 下降至 43.67 MPa,提升效果有限。加入 HY-EP 后,材料出现明显的屈服,拉伸强度和断裂伸长率得到提升;样品出现细颈,银纹化明显,表明韧性提升;添加 2 phr HY-EP

后，材料断裂伸长率达到峰值，为364.92%，相较于不掺杂HY-EP的PLA/TPU复合材料试样提升了近7倍，且拉伸强度较不含环氧树脂的样品有明显提升，达到47.22 MPa；缺口冲击强度的变化规律类似，在3 phr的HY-EP含量下达到峰值的15.08 kJ/m^2，提升了122%。随着HY-EP含量进一步提高，复合材料的综合力学性能皆下降，这可能是由于HY-EP的相对分子质量较小，当其掺杂过量后会对复合材料产生增塑作用，最终影响力学性能。

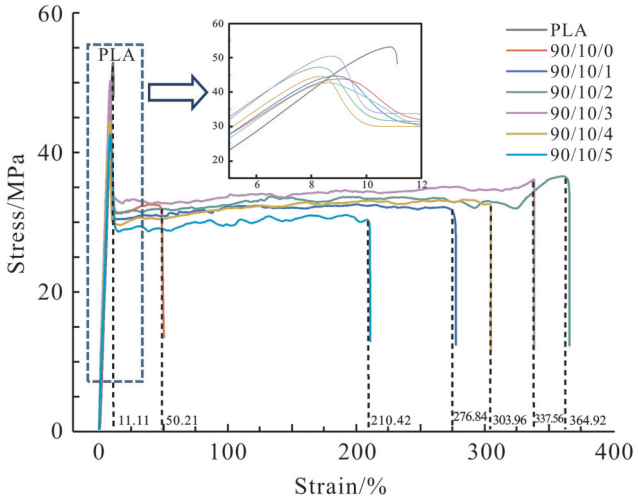


Fig. 3 Stress- strain curves of neat PLA and PLA/TPU/HY- EP composites

2.3 差示扫描量热分析

Fig.4为PLA，TPU及其复合材料共混前后的DSC曲线，Tab.2列出了相应的玻璃化转变温度（T_g）、结晶温度（T_{cc}）和熔融温度（T_m）。

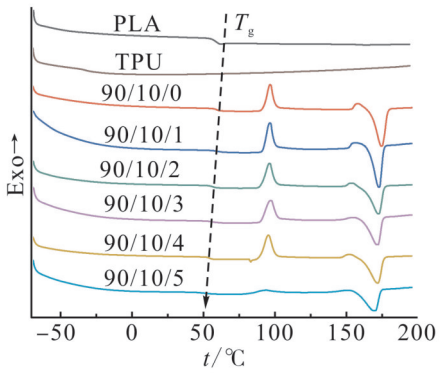


Fig. 4 DSC curves of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites

如图所示，纯PLA和纯TPU的T_g分别为64.4 ℃和－32.9 ℃。共混后的复合材料均只出现1个T_g，这可能是由于TPU组分含量低所致。两相共混后的PLA/TPU/HY-EP (90/10/0)的T_g较纯PLA略微降低，这是由于TPU链段的加入提升了整体链柔性，但有限的提升效果表明相容性较差。加入HY-EP后，TPU柔性链在增容作用下与PLA链相连，进一步提升了链段的运动能力，使其能在更低温度活动，因此T_g继续下降；随着HY-EP的量逐渐增大，PLA的T_g持续下降，这进一步验证了HY-EP的增容作用。纯PLA的DSC曲线中之所以无结晶峰和熔融峰，是由于大量的酯基的存在影响了整体分子链的柔顺度，同时大分子运动能力的降低阻碍了分子链的有序排列，使其在降温过程中的结晶速率变得极慢，从而不出现结晶峰和熔融峰。但未添加HY-EP的PLA/TPU复合材料出现该2种峰，表明

Tab. 2 DSC data of PLA and its composites

Samples	T_g/℃	T_{cc}/℃	T_m/℃
PLA	64.4		175.3
TPU	－32.9		
PLA/TPU/HY-EP(90/10/0)	60.2	97.7	175.1
PLA/TPU/HY-EP(90/10/1)	59.0	97.1	173.4
PLA/TPU/HY-EP(90/10/2)	58.7	96.9	172.9
PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)	57.6	96.8	172.4
PLA/TPU/HY-EP(90/10/4)	56.4	95.8	172.2
PLA/TPU/HY-EP(90/10/5)	50.4	94.4	170.2

T_g: glass transition temperature; T_{cc}:crystallization temperature; T_m: melting temperature

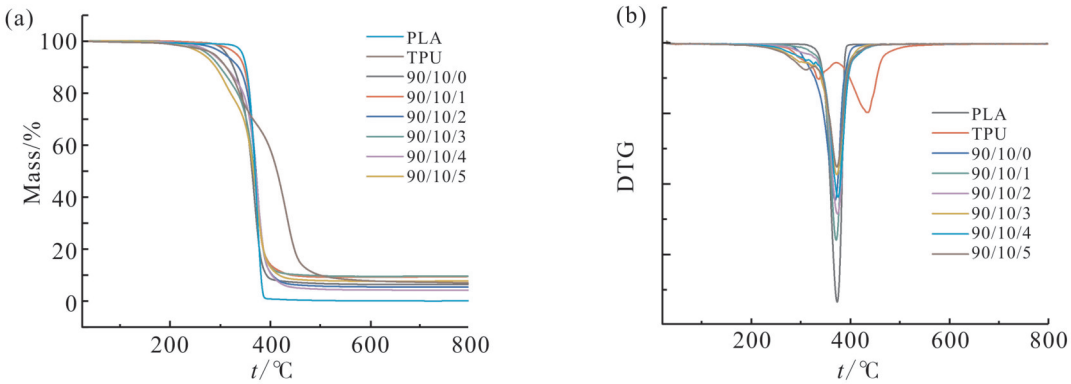


Fig. 5 (a) TG and (b) DTG curves of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites

Tab. 3 Thermal stability parameters of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites

Samples	$T_{5\%}$ /℃	$T_{50\%}$/℃	T_{final}/℃	T_{max}/℃	
				Step 1	Step 2
PLA	342.8	369.7	389.4	373.4	
TPU	279.7	412.9	506.1	337.3	436.1
PLA/TPU/HY-EP (90/10/0)	310.1	363.6	409.3	370.7	
PLA/TPU/HY-EP (90/10/1)	327.5	370.9	437.7	371.3	
PLA/TPU/HY-EP (90/10/2)	301.7	371.6	441.0	374.0	
PLA/TPU/HY-EP (90/10/3)	269.8	367.4	432.7	373.8	
PLA/TPU/HY-EP (90/10/4)	278.8	370.8	458.7	375.3	
PLA/TPU/HY-EP (90/10/5)	258.1	366.3	443.5	373.0	

$T_{5\%}$: temperature at 5% mass loss of material quality; $T_{50\%}$: temperature at 50% mass loss of material quality; T_{final}: temperature at 100% mass loss of material quality; T_{max}: temperature at the highest loss rate

TPU的加入加快了PLA的结晶速率，促进晶体生成。随着HY-EP添加量增加，结晶峰（T_{cc}）及熔融峰（T_m）均向低温方向移动，这是由于HY-EP使PLA与TPU的分子链相连，增加了分子间缠绕，限制了PLA结晶，导致结晶温度降低，晶体完善程度变差。

2.4　热失重分析

Fig.5(a)和Fig.5(b)分别为PLA，TPU和PLA/TPU复合材料共混前后的TG图和DTG图，相应的热稳定性数据列于Tab.3中。

如图所示，纯PLA于342.8 ℃开始分解，在389.4 ℃趋于稳定，DTG图中在373.4 ℃处出现峰值，说明此时降解速率达到最大，这是由于在该温度时，其主链上的端基丢失导致分解加速；而纯TPU的热降解分2段进行，从279.7 ℃开始分解，直到506.1 ℃趋于稳定，由DTG图可以看出，TPU曲线出现2个不同的峰，表明期间有2个不同的降解速率。不添加HY-EP的PLA/TPU复合材料在310.1 ℃开始分解，于409.3 ℃分解完全；随着HY-EP含量的不断增加，PLA/TPU/HY-EP复合材料的初始分解温度逐渐降低；其次，HY-EP与PLA/TPU链之间反应形成了接枝共聚物PLA-*g*-TPU，该共聚物的热稳定性较差，在高温时会优先分解。共混物的最大降解速率温度（T_{max}）和最终分解温度（T_{final}）均有所增加，说明HY-EP提高了复合材料

的热稳定性。

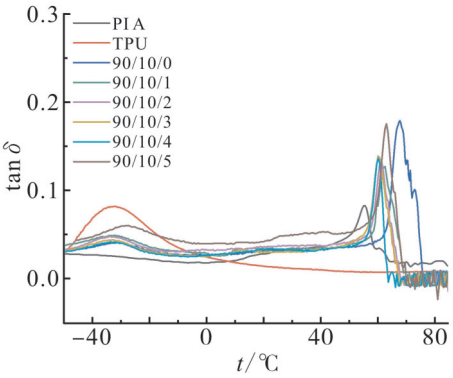


Fig. 6 Loss factor (tanδ) curves of PLA and PLA/TPU/HY- EP composites

2.5 动态力学性能分析

Fig.6为PLA，TPU及其复合材料经DMTA测试分析后得到的动态力学分析曲线。纯TPU的T_g（T_{g1}）与纯PLA的T_g（T_{g2}）分别为－32.0 ℃和55.3 ℃。HY-EP加入后，PLA/TPU/HY-EP复合材料的T_{g1}并没有出现太大的变化。PLA/TPU/HY-EP(90/10/0)复合材料的T_{g2}相较于纯PLA有一定提高，这是由于链长较大的TPU与PLA之间相互缠结，大分子链的运动能力下降；加入1 phr HY-EP后，复合材料的T_{g2}由67.8 ℃骤降至62.6 ℃；且随着HY-EP含量的增加，两者T_g逐渐靠拢，ΔT_g变小，这是由于HY-EP的环氧开环反应使PLA与TPU的柔性链相连，整体链段的运动能力提升造成T_g下降，从而改善了PLA与TPU之间的相容性。

2.6 表面形貌分析

Fig.7为PLA/TPU复合材料在常温经过悬臂梁冲击测试后的断口表面SEM图。纯PLA的断裂表面光滑，无韧性特征，表现出明显的脆性断裂；PLA/TPU/HY-EP(90/10/0)试样的断裂表面出现TPU的圆形颗粒，部分区域出现少量空腔，但整体依旧光滑，海岛结构明显，这是由于PLA与TPU之间相容性较差，两相之间无粘连，经过些许外力作用就会轻易分离，无法吸收更多的能量。随着HY-EP的加入，试样断裂表面变得粗糙，

Tab. 4 DMTA data of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites

Samples	T_{g1}/℃	T_{g2}/℃	ΔT_g/℃
PLA		55.3	
TPU	−32.0		
PLA/TPU/HY-EP (90/10/0)	−31.4	67.8	99.2
PLA/TPU/HY-EP (90/10/1)	−32.4	62.6	95.0
PLA/TPU/HY-EP (90/10/2)	−32.3	61.2	93.5
PLA/TPU/HY-EP (90/10/3)	−32.9	60.1	93.0
PLA/TPU/HY-EP (90/10/4)	−33.4	59.1	92.5
PLA/TPU/HY-EP (90/10/5)	−31.7	58.8	90.5

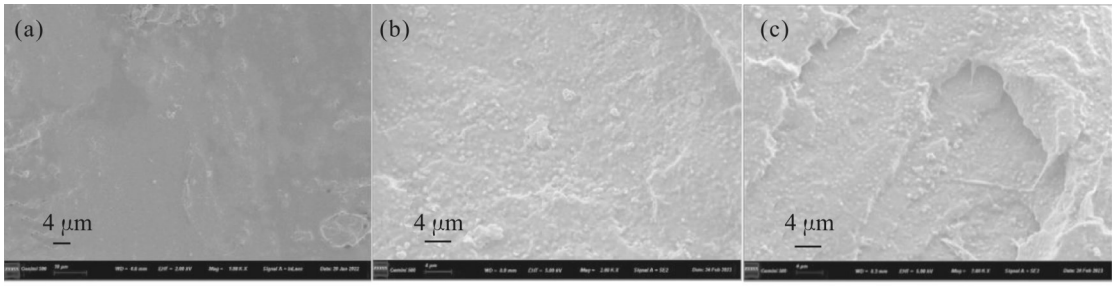


Fig. 7 Microstructure of impact fracture surface of PLA and PLA/TPU/HY-EP composites: (a) PLA; (b) PLA/TPU/HY-EP (90/10/0); (c) PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)

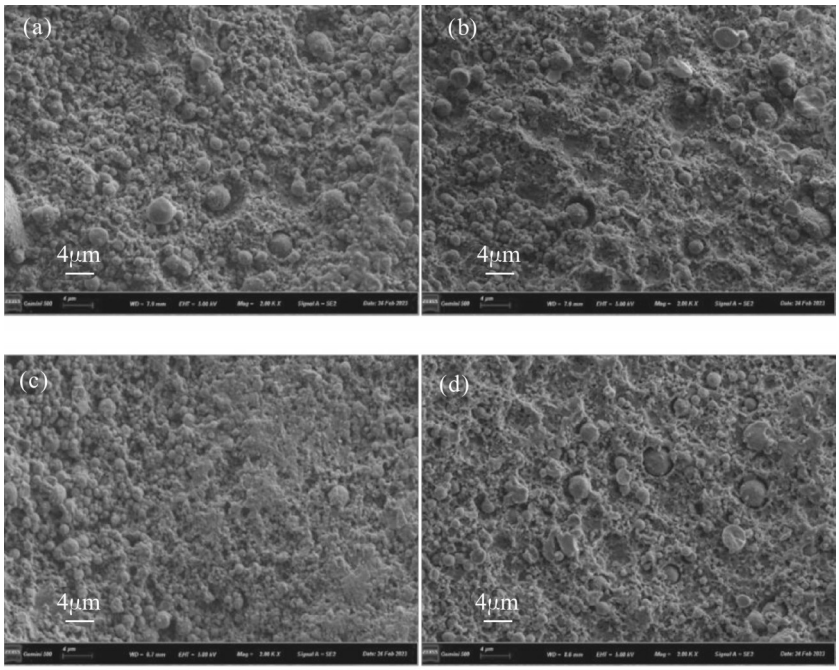


Fig. 8 SEM images of the quenched fracture surface of PLA/TPU/HY-EP composites: (a) PLA/TPU/HY-EP(90/10/0); (b) PLA/TPU/HY-EP(90/10/1); (c) PLA/TPU/HY-EP(90/10/3); (d) PLA/TPU/HY-EP(90/10/5)

空腔处出现丝状结构,韧性得到提升。

Fig.8为冷冻刻蚀后的PLA/TPU复合材料的断口表面SEM图。将样品置于甲醇-水溶液中,利用溶液刻蚀掉断口表面的PLA基体,使表面的TPU颗粒暴露出来。从Fig.8(a)可以看出,TPU颗粒呈圆形,相较周边环境突出,证明两相之间相容性较弱。加入1 phr HY-EP后(Fig.8(b)),TPU的颗粒略微变小,且整体突出情况变少,与PLA基体的边界变得模糊;Fig.8(c)中刻蚀表面的增容效果最好,圆形颗粒基本融于基体,表明HY-EP增容效果显著。

3　结论

(1)利用HY-EP的环氧基团与PLA及TPU的端羟基/羧基进行环氧开环反应产生支化聚合物,通过化学键的连接减少两相之间的相互排斥,实现了对PLA/TPU复合材料的增容。

(2)与PLA/TPU/HY-EP(90/10/0)复合材料相比,PLA/TPU/HY-EP(90/10/3)复合材料的拉伸强度由43.67 MPa提升到50.42 MPa;断裂伸长率从50.21%提升至337.56%;缺口冲击强度由6.78 kJ/m^{2}提高到15.08 kJ/m^2。

(3)本文采用HY-EP作为反应型增容剂,有效改善了PLA与TPU材料之间的相容性及力学性能,为制备兼具韧性及强度PLA复合材料提供了参考。

参考文献:

[1] Han Y, Shi J W, Mao L X, *et al*. Improvement of compatibility and mechanical performances of PLA/PBAT composites with epoxidized soybean oil as compatibilizer[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59: 21779-21790.

[2] 朱斐超, 于斌, 韩建, 等. 熔喷非织造用PHBV/PLA共混体系的结构与相容性[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(8): 81-84.
Zhu F C, Yu B, Han J, *et al*. Structure and miscibility of poly(3-hydroxybutyrate- co- 3- Hydroxyvalerate) and poly(lactic acid) blends for melt-blown nonwovens[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(8): 81-84.

[3] Xu X D, Dai J F, Ma Z W, *et al*. Manipulating interphase reactions for mechanically robust, flame- retardant and sustainable polylactide biocomposites[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 190:107930-107945.

[4] Kilic N T, Can B N, Kodal M, *et al*. Compatibilization of PLA/PBAT blends by using epoxy - POSS[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 136: 47217.

[5] Behera K, Veluri S, Chang Y H, *et al*. Nanofillers- induced

modifications in microstructure and properties of PBAT/PP blend: enhanced rigidity, heat resistance, and electrical conductivity[J]. Polymer, 2020, 203: 122758-122770.

[6] Behera K, Chen J F, Yang J M, *et al*. Evident improvement in burning anti- dripping performance, ductility and electrical conductivity of PLA/PVDF/PMMA ternary blend- based nanocomposites with additions of carbon nanotubes and organoclay[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 248: 110371-110382.

[7] Ahn J H, Hong J S, Ahn K H, *et al*. Mechanically enhanced poly (lactic acid)/polyurethane blend with interfacial- localized clay particles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139: 52466-52481.

[8] Ozkoc G, Kemaloglu S. Morphology, biodegradability, mechanical, and thermal properties of nanocomposite films based on PLA and plasticized PLA[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114: 2481-2487.

[9] Anastasiadis S H, Gancarz I, Koberstein J T, *et al*. Compatibilizing effect of block copolymers added to the polymer/polymer interface[J]. Macromolecules, 1989, 22: 1449-1453.

[10] 蒋文柔, 包睿莹, 刘正英, 等. PLA-g-MAH增容改性PLA/PETG共混物的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3): 107-110.
Jiang W R, Bao R Y, Liu Z Y, *et al*. Structure and properties of PLA/PETG blends compatibilized by PLA-g-MAH[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(3): 107-110.

[11] Ho C H, Wang C H, Lin C I, *et al*. Synthesis and characterization of TPO- PLA copolymer and its behavior as compatibilizer for PLA/TPO blends[J]. Polymer, 2008, 49: 3902-3910.

Reactive Compatibilization of Polylactic Acid Composites with Hydantoin Epoxy Resin

Yinqiu Huang, Chengyu Yan, Dezhi Jiang, Jiaxin Fan, Longxiang Tang
(*School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

ABSTRACT: Polylactic acid (PLA) has attracted attention as a biodegradable material in recent years, but its inherent brittleness limits its further application and requires toughening modification. Thermoplastic polyurethane (TPU), as a highly tough rubber, can effectively improve the impact toughness of PLA. However, due to their poor compatibility, the toughening effect is limited. In this paper, a reactive compatibilizer, HY-EP epoxy resin, was used to bind with hydroxyl or carboxyl groups on PLA and TPU during the melt blending process to form chemical bonds through epoxy ring-opening reaction. The compatibility of the PLA/TPU composites is improved by strong interfacial action to improve the mechanical properties. The results of differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), dynamic mechanical thermal analysis (DMTA), scanning electron microscopy (SEM) and other tests show that the compatibility of the composite material is significantly improved. When the content of HY-EP is 3 phr, the impact strength of the PLA/TPU/HY-EP (90/10/3) composite can reach up to 15.08 kJ/m^2, which is nearly five times higher than that of neat PLA, and the elongation at break reaches 337.56% with the tensile strength of 50.42 MPa, indicating that PLA/TPU composites with both high strength and toughness were prepared successfully.

Keywords: polylactic acid; thermoplastic polyurethane elastomer; Haiyin epoxy resin; toughening modification; reactive compatibilization