

不对称 PLLA/PDLA 协同增强 TPU 共混物的制备及性能研究

颜小香¹,汪秀才¹,张继中¹,吴晨鹏¹,孔俊俊^{1*},王达伟²

(1. 苏州工学院材料工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 江苏中利集团股份有限公司, 江苏 常熟 215500)

摘要: 以热塑性聚氨酯弹性体(TPU)树脂为基体,添加不对称比例的左旋聚乳酸(PLLA)和右旋聚乳酸(PDLA),采用熔融共混法制备不对称 PLLA/PDLA 协同改性的 TPU/PLA 共混物。以甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)为增容剂,以过氧化二异丙苯(DCP)为引发剂,改善共混物的相容性。利用差示扫描量热仪、旋转流变仪、万能试验机、冲击试验机等对 TPU/PLA 共混物的热性能、流变性能、力学性能等进行详细研究。结果表明:无引发剂作用时,小分子 GMA 在 TPU/PLA 共混物中仅起到增塑作用,共混物的相容性并未得到明显改善。GMA 和 DCP 的同时加入有效改善了 TPU 与 PLA 组分间的相容性,增加了组分间分子链的缠结,增容改性共混物的结晶能力略有下降,但储能模量、损耗模量和复数黏度随 DCP 含量的增加逐渐升高。当 DCP 质量分数为 0.25% 时, UAG5D 共混物的拉伸强度和冲击强度相对于未改性的 TPU/PLA 共混物分别提高 186.7% 和 86.0%,能够较好地实现强韧平衡。

关键词: 左旋聚乳酸;立构复合聚乳酸;增容;力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0042-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.008

Preparation and Performance Study of TPU Blends Synergistically Enhanced by Asymmetric PLLA/PDLA

YAN Xiaoxiang¹, WANG Xiucan¹, ZHANG Jizhong¹, WU Chenpeng¹, KONG Junjun^{1*}, WANG Dawei²

(1. School of Materials Engineering, Suzhou University of Technology, Changshu 215500, China;

2. Jiangsu Zhongli Group Co., Ltd., Changshu 215500, China)

Abstract: The study used thermoplastic polyurethane elastomer (TPU) resin as the matrix, and prepared asymmetric PLLA/PDLA-modified TPU/PLA blends by adding asymmetrical proportions of *L*-lactide (PLLA) and *D*-lactide (PDLA) via melt compounding. Glycidyl methacrylate (GMA) was used as a compatibilizer, and dicumyl peroxide (DCP) as an initiator to enhance the compatibility of the blends. The thermal properties, rheological properties, and mechanical properties of the TPU/PLA blends were thoroughly investigated using differential scanning calorimetry, rotational rheometer, universal testing machine, and impact testing machine. The results showed that without the initiator, GMA only acted as a plasticizer in the TPU/PLA blends, and the compatibility of the blends was not significantly improved. The simultaneous addition of GMA and DCP effectively enhanced the compatibility between TPU and PLA components, increasing the entanglement of molecular chains between the components. The crystallization ability of the compatibilized blends was slightly reduced, but the storage modulus, loss modulus, and complex viscosity gradually increased with the increase of DCP content. When the mass fraction of DCP was 0.25%, the tensile strength and impact strength of the UAG5D blends were increased by 186.7% and 86.0%, respectively, compared to the unmodified TPU/PLA blends, achieving a better balance of strength and toughness.

Keywords: PLLA; Stereocomplex polylactic acid; Compatibilization; Mechanical property

收稿日期 Submitted date 2025-02-26; 修回日期 Revised date 2025-03-18; 录用日期 Accepted date 2025-04-15

基金项目: 苏州市科技攻关项目/苏州市重大科技成果转化项目 (SZCG202504)

*联系人, jkkong9201@163.com

引用本文: 颜小香,汪秀才,张继中,等. 不对称 PLLA/PDLA 协同增强 TPU 共混物的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 42-47.

Citation: YAN X X, WANG X C, ZHANG J Z, et al. Preparation and performance study of TPU blends synergistically enhanced by asymmetric PLLA/PDLA[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 42-47.

热塑性聚氨酯弹性体(TPU)通常由刚性的异氰酸酯硬段和柔性的多元醇软段组成。作为一种兼具橡胶弹性和塑料加工性能的热塑性弹性体,TPU因其优异的耐磨性、抗撕裂性、耐低温性、可回收性及性能可控性,被广泛应用于鞋材、医疗器械、服装、管材、汽车部件和工业传动等领域^[1-4]。然而,在极端力学负荷或长期摩擦工况下,传统TPU仍存在机械强度不足、耐磨性能下降等问题,限制其在高性能场景中的应用^[5-7]。

热塑性聚酯类的可生物降解聚乳酸(PLA)材料,不仅具有优异的生物相容性和生物降解性能,还具有可与传统石油基高分子材料相当的高强度、高硬度、高透明性、热塑性和良好的成型加工能力,使其在包装行业和医药行业等领域展现出极大的应用潜力^[8-10]。将PLA与TPU共混,可结合TPU的柔韧性与PLA的刚性,实现性能的协同提升^[11-13]。研究表明,通过熔融共混法制备TPU/PLA复合材料可显著提高共混物的强度^[14-15]。当TPU质量分数大于30%时,PLA/TPU共混物的冲击强度和断裂伸长率显著提高,但拉伸强度随TPU含量的增加而逐渐降低^[16]。然而,TPU/PLA共混物的力学性能受两相相容性影响。当PLA质量分数超过30%时,因相分离加剧,拉伸强度下降。采用反应性增容法可改善两者的界面结合能力。当PLA被过氧化物引发自由基时,PLA可与丙烯酸甲酯(MA)和甲基丙烯酸甲酯(MMA)的C=C双键反应形成PLA接枝共聚物,使PLA/TPU共混物的冲击强度提高25%。此外,甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)的环氧基与羧基具有反应性,为聚醚基TPU与PLA-g-GMA接枝共聚物共混形成PLA-g-TPU接枝共聚物提供可能^[17-18]。

尽管如此,现有研究多集中于普通PLA,如左旋聚乳酸(PLLA)或右旋聚乳酸(PDLA),但这些均相PLA本身质脆,耐热性能较差^[19-20]。将PLLA和PDLA共混形成具有双螺旋结构的立构复合晶(ScPLA)^[21],其紧密的链堆叠和分子间强相互作用使其相较于单手性的PLLA和PDLA晶体(HCs)具有更高的熔点、更强的机械性能、更好的热稳定性和抗水解性能^[22-24]。然而,对于具有更高强度和热稳定

性的ScPLA与PLLA协同增强热塑性弹性体TPU的机制,尚未进行深入探索。

本文以TPU树脂为基体,添加不对称含量的PLLA和PDLA,采用熔融共混法制备PLLA和ScPLA协同改性的TPU/PLA共混物。加入GMA做增容剂,同时加入过氧化二异丙苯(DCP)作为引发剂,以增强TPU与PLA的界面相容性。此外,本文还对共混物的热性能、流变性能、力学性能和亲水性能等进行详细研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLLA, 4032D, 美国 NatureWorks 公司; PDLA, 1010, 中国科学院长春应用化学研究所; TPU, A290, 美瑞新材料股份有限公司; GMA, 分析纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司; DCP, 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

精密鼓风干燥箱, BPG-9240A, 上海一恒科学仪器有限公司; 转矩流变仪, XSS-300, 上海科创橡塑机械设备有限公司; 平板硫化仪, KXPB-50, 承德市科标检测仪器制造有限公司; 气动冲片机, TH-7010B, 江苏天惠试验机械有限公司; 万能材料试验机, WDW-5, 济南鑫标自动化设备制造有限公司; 摆锤冲击试验机, RH-6050, 扬州市韧恒机械厂; 差示扫描量热仪(DSC), Q20, 美国 TA 仪器公司; 旋转流变仪, AR2000, 美国 TA 仪器公司; 扫描电子显微镜(SEM), XL30FSEM FEG, 美国 FEI 公司。

1.3 样品制备

表1为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的配方。实验前,将 TPU、PLLA、PDLA 放置在 70 °C 的精密鼓风干燥箱中干燥不少于 24 h。根据表1配方的对应比例称取物料,将称好的物料 TPU、PLLA、PDLA 充分混合均匀,然后通过料斗加入转矩流变仪中,熔融温度为 190 °C,转速为 60 r/min。待聚合物混合 120 s 后,加入 PLLA/PDLA 共混物总质量 20% 的 GMA 以及占 GMA 质量 5% 的 DCP,加入后继续共混至扭矩稳定,停止实验,取出所制物料。将每组样品置于 190 °C 的平板硫化机中,模压成型,得到测试所需的样品。

表1 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的配方

Tab.1 Formula of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

单位:%

样品	W_{TPU}	W_{PLLA}	W_{PDLA}	W_{GMA}	W_{DCP}
UA	80	15	5	0	0.00
UAG4	80	15	5	4	0.00
UAG2D	90	5	5	2	0.10
UAG3D	85	10	5	3	0.15
UAG4D	80	15	5	4	0.20
UAG5D	75	20	5	5	0.25

1.4 性能测试及表征

热性能测试:采用差示扫描量热仪,在氮气气氛下,取

约 5~10 mg 的试样放置于坩锅中,气流量为 50 mL/min,以 10 °C/min 的升降温速率将共混物从室温升温至 240 °C,

然后以 10 °C/min 降温至 20 °C, 最后再以同样的升温速度升温至 200 °C, 记录第一次升温、降温和第二次升温曲线。研究共混物的玻璃化转变温度(t_g)、结晶温度(t_c)、熔融温度(t_m)。

流变性能测试: 采用旋转流变仪对共混物的流变性能进行表征。不同比例的 TPU/PLLA/PDLA 共混物在 190 °C 热压成约厚 1 mm、直径 25 mm 的圆片。测试温度为 190 °C, 在应变为 1.25% 的小振幅振荡剪切条件下采用动态频率扫描模式测试样品的流变性能, 频率范围为 0.1~100.0 rad/s。

拉伸性能测试: 根据 GB/T 528—2009, 以 10 mm/min 的拉伸速度测试共混物的静态拉伸性能。哑铃形样条, 样品尺寸为 20 mm×4 mm×1 mm, 结果取 5 个有效试样的平均值。

冲击性能测试: 根据 GB/T 1843—2008, 采用摆锤冲击试验仪对样品进行冲击性能测试。样品尺寸为 40 mm×10 mm×3 mm, 结果取 5 次有效测试的平均值。

SEM 测试: 样品在液氮中浸泡 15 min, 快速脆断以获得完整的断裂面, 并对样品断面进行喷金处理, 观察样品断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 改性 TPU/PLA 共混物的塑化性能分析

不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的塑化过程在转矩流变仪中进行, 转矩的变化可以反映共混过程中的重要反应。图 1 为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的扭矩曲线。从图 1 可以看出, 共混过程大致分为 3 个阶段: TPU/PLA 共混物的熔融塑化过程; 添

加增容剂、引发剂过程; 再次充分熔融共混过程。从共混扭矩曲线可以看到, 共混初始阶段, 所有共混物均表现出较高的扭矩, 扭矩超过 130 N·m, 共混物全部塑化之后, 扭矩迅速下降。在共混物塑化过程中, 仅添加增容剂 GMA (无引发剂 DCP) 的样品 UAG4 的扭矩明显低于其他样品, 这可能是由于在无引发剂的作用下, 小分子的增容剂在共混体系内仅表现出一定的增塑作用, 未起到增强 TPU 与 PLA 基质界面结合的作用。而共同添加增容剂与引发剂的共混体系中, 随增容剂含量的增加, 共混体系的扭矩呈现逐渐增加的趋势。这说明在 DCP 的作用下, 体系可能发生了扩链或交联现象, 增加了分子链间的缠结作用, 从而表现出较高的熔体黏度。

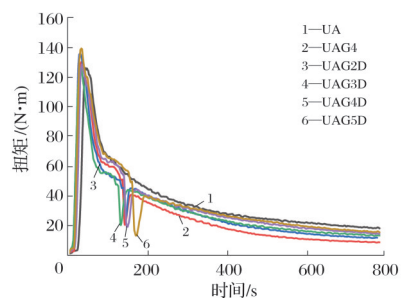


图 1 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的扭矩曲线
Fig.1 Torque curves of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

2.2 改性 TPU/PLA 共混物的热性能分析

图 2 为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的 DSC 曲线。表 2 为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的热性能数据。

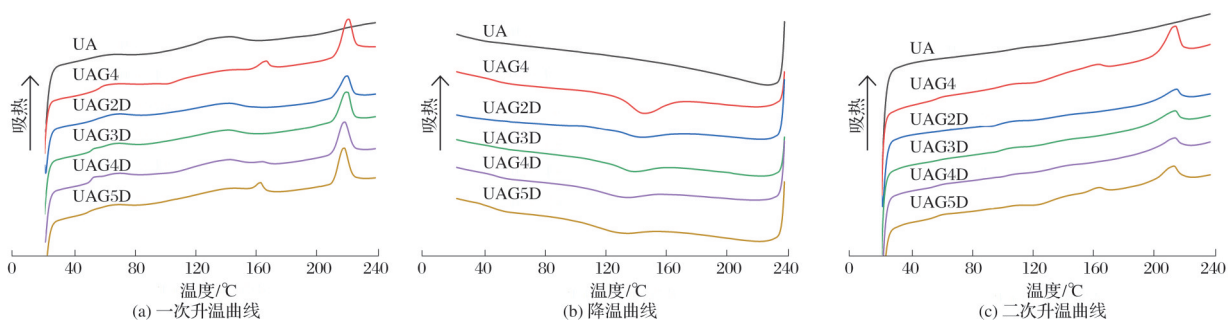


图 2 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的 DSC 曲线
Fig.2 DSC curves of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

表 2 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的热性能数据

Tab.2 Thermal properties data of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

单位: °C

样品	一次升温 t_g	一次升温 t_m	降温 t_c	二次升温 t_g	二次升温 t_m
UA	76.77	—	—	100.30	—
UAG4	83.51	220.68	144.06	56.60、100.30	163.50、213.80
UAG2D	75.59	219.34	142.17	99.90	214.60
UAG3D	74.47	218.63	137.77	99.40	213.80
UAG4D	74.65	217.35	132.77	56.40、99.50	213.30
UAG5D	74.77	217.14	130.82	55.20、99.00	163.90、212.90

注: “—” 表示无相关数据。

从图2a可以看出,在不对称 PLLA/PDLA 改性 TPU/PLA 共混物的热历史曲线中,共混物均表现出明显的玻璃化转变和熔融过程。含有 GMA 共混物的加热曲线均表现出 ScPLA 特有的熔融峰(215 °C左右)。从图2b和表2可以看出,UAG4 共混物表现出较强的结晶能力,且结晶温度相对较高。这可能是由于在无引发剂的作用下,小分子 GMA 主要起到增塑作用,提高了 PLA 分子链段的运动能力,使其结晶能力增强。随着 GMA 与 DCP 的协同加入,共混物的结晶温度逐渐下降,结晶能力逐渐降低。可能是由于在引发剂与增容剂的协同作用下,GMA 的活性基团引发 TPU 与 PLA 分子链间的相互作用,增强了分子链间的缠结,使分子链的活动能力下降,结晶能力降低。

从图2c可以看出,当共混物中未添加增容剂和引发剂时,共混体系表现出无定形聚合物的显著特征,在 t_g 和 t_m 处都没有明显的拐点或峰,仅在 100 °C 左右表现出明显的玻璃化转变,而无结晶峰和熔融峰的出现。在加入 GMA 增容剂的 UAG4 体系中,共混物不仅表现出两个玻璃化转变特征峰,同时出现两个晶体熔融峰,两个玻璃化转变特征峰分别对应 PLLA 和 TPU 的 t_g ,且该共混物中 TPU 的 t_g 与 UA 中的 t_g 保持一致。这说明仅加入 GMA 做增容剂,共混体系的相容性并未得到改善。213 °C 左右有熔融峰,熔融峰面积随着 PLLA 的增大而增加,说明立构复合晶体的占比在增多。UAG5D 共混材料在 160 °C 也有一个熔融峰,这是均相晶体的熔融峰,要比立构复合结构的熔融温度低很多。对比两次升温曲线发现,二次升温熔融峰的面积比第一次升温过程的熔融峰面积小,说明热历史更有利于立构复合晶体的形成,因此熔融峰面积会更大,峰也变得更显著。

从表2可以看出,当共混体系同时加入增容剂和引发剂后,随共混物中 PLLA 含量的增加,共混体系两个玻璃化转变特征峰出现稍许变动,共混体系中 PLLA 的 t_g 略有升高,而 TPU 的 t_g 略有下降。说明在 GMA 与 DCP 增容的共混体系中,共混物的相容性有所改善。

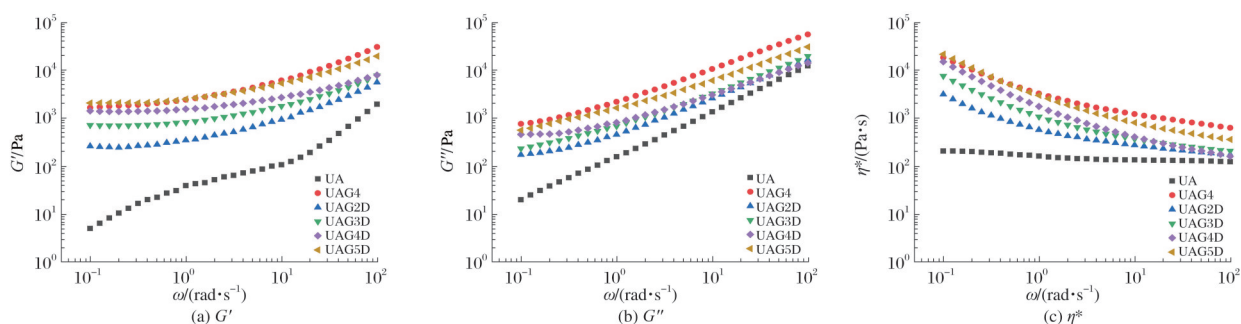


图3 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的流变曲线

Fig.3 Rheological curves of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

2.4 改性 TPU/PLA 共混物的力学性能分析

表3为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混

2.3 改性 TPU/PLA 共混物的流变性能分析

图3为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的流变曲线。从图3可以看出,所有 TPU/PLA 共混物的储能模量(G')、损耗模量(G'')均随着角频率(ω)的增大而增大,而复数黏度(η^*)随着 ω 的增大而减小。这是因为高分子材料中的大分子链之间有着一定的物理缠结,这些缠结因为分子链热运动而处在断裂和重组的动态平衡之中。UA 的 G' 、 G'' 和 η^* 均较低,在加入一定量的 GMA 和 DCP 后,共混物的 G' 、 G'' 和 η^* 均有所增加,这表明体系内产生了支化和交联结构,使 TPU 和 PLLA/PDLA 之间产生一定的缠结,导致两分子间的摩擦阻力变大,从而使 G' 、 G'' 和 η^* 均有所升高^[25]。随着 PLLA 含量的增加,共混物中 GMA 与 DCP 的含量也逐渐增加,共混体系的 G' 、 G'' 和 η^* 出现逐渐增加的趋势,表明体系内的支化和交联程度也在不断增加。此外,当 PLLA 含量相同时,UAG4 的 G' 、 G'' 和 η^* 更大,且普遍高于其他任一添加增容剂和交联剂的共混物。这可能是由于过量的小分子 GMA 在体系内部起到了增塑作用,使共混物的 G' 、 G'' 和 η^* 均下降。此外,高频区的数值要比低频区的数值要更趋于集中。这可能是由于高剪切频率下导致两相界面处黏度降低,削弱增容效果。

从图3c可以看出,UA 在低频区出现明显的牛顿平台,而 $\omega > 10$ rad/s 时,共混物的 η^* 随 ω 增加逐渐下降的剪切变稀现象。加入增容剂和引发剂改性的 TPU/PLA 共混物具有更高的 η^* ,低频区的牛顿平台消失,且剪切变稀效应更明显。这种现象主要由于体系内产生了支化和交联结构,使 TPU 和 PLA 之间产生一定的缠结,导致共混物的熔体黏度增大,在高频剪切作用下,分子链解缠结出现更明显的剪切变稀现象。此外,共混体系的 η^* 随着 ω 的增大而减小,有着塑性流体和假塑性流体特有的“剪切变稀”现象,源于大分子链在这一过程中的解缠作用。随着 GMA 与 DCP 含量的增加,体系内的支化和交联程度增大,在剪切速率增大的情况下,共混体系的 η^* 下降得更明显,说明增容后的共混体系内部具有更高含量的缠结结构,在高剪切作用下更多的缠结结构被打开,从而表现出更明显的“剪切变稀”效应。

物的拉伸性能及冲击强度数据,图4为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的拉伸应力-应变曲线。

从表3和图4可以看出,改性的UA共混物拉伸模量为0.14 MPa,拉伸强度为13.06 MPa,断裂伸长率为852.5%,表现出热塑性弹性体明显的低强度高韧性特征。加入GMA改性的UAG4共混物,拉伸模量下降,拉伸强度无明显变化,断裂伸长率有所提升,表现出增塑改性共混物的显著特征。而同时加入GMA和DCP改性的增容共混物,拉伸模量、拉伸强度和断裂伸长率相对于UA共混物均有明显的改善,UAG5D共混物的拉伸模量和拉伸强度相对于UA共混物分别提高35.7%和186.7%。这说明体系中添

表3 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的拉伸性能及冲击强度数据

Tab.3 Tensile properties and impact strength data of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

样品	拉伸模量/MPa	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	冲击强度/(kJ·m ⁻²)
UA	0.14±0.02	13.06±2.51	852.5±42.3	12.20±2.11
UAG4	0.09±0.01	13.31±3.11	901.3±37.4	13.25±1.89
UAG2D	0.15±0.02	24.15±2.87	1 110.5±48.8	14.32±1.97
UAG3D	0.14±0.06	35.69±1.98	1 215.6±39.3	13.32±2.02
UAG4D	0.17±0.02	31.46±2.55	1 062.2±42.2	21.25±3.15
UAG5D	0.19±0.01	37.44±3.14	1 027.8±38.7	22.70±2.54

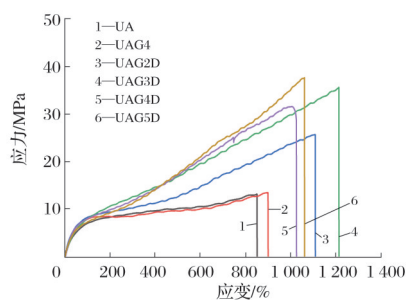


图4 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curves of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA

拉伸性能和冲击性能测试结果均表明,增容后的 TPU/PLA 共混物体系的韧性和强度均得到明显的提升,说明组分间界面相容性得到了明显改善,提高了共混体系对外力的耗散能力,能够较好地实现刚韧性平衡。

2.5 改性 TPU/PLA 共混物的形貌分析

共混物的断面形貌不仅能够反映共混组分间的相容性,同样能够反映共混物的力学性能。图5为不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的 SEM 照片。从图5可以看出,UA 共混物的断面较为光滑平整,但表现出明显的两相结构,且相界面清晰,组分间相容性较差。未添加引发剂的 UAG4 共混物的形貌与 UA 相似,但分散相的尺寸略有增加,共混物仍存在较明显的相界面,相容性未得到有效改善。添加了适量增容剂与引发的共混样品(UAG2D和UAG4D),随着 PLLA 含量的增加,PLA 相的尺寸逐渐增大,共混体系的微观相界面逐渐模糊化特征。

加的 PLLA 和 PDLA 起到明显的增强作用,且 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的断裂伸长率相对于 UA 和 UAG4 共混物均得到明显提升,增容改性后的 TPU/PLA 共混物的拉伸韧性也有所提高。

从表3还可以看出,仅加入 GMA 改性的 UAG4 共混物冲击强度相对 UA 共混物提高 8.6%,而 GMA 和 DCP 协同增容的 TPU/PLA 共混物的冲击强度进一步提升,其中 UAG5D 共混物的冲击强度最高,其冲击强度约为 UA 共混物的 1.86 倍。

这说明同时加入 GMA 和 DCP 起到了有效的增容作用,与流变性能变化相一致。

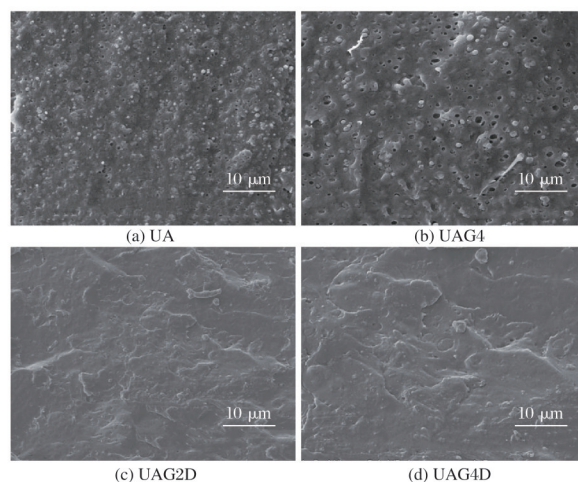


图5 不对称 PLLA/PDLA 协同改性 TPU/PLA 共混物的 SEM 照片(2 000×)

Fig.5 SEM images of TPU/PLA blends modified synergistically by asymmetric PLLA/PDLA (2 000×)

3 结论

在 TPU 树脂中通过添加不对称 PLLA/PDLA 制备 PLLA/PDLA 协同改性的 TPU/PLA 共混物,对共混物的熔体流动性能、热性能、力学性能等进行研究。

DSC 结果显示,加入 GMA 的共混体系中均出现 ScPLA 特有的结晶现象,熔融峰高达 213 °C。随着 GMA 和 DCP 的同时加入,TPU 与 PLA 分子链间的缠结程度增加,聚合物的分子链段运动能力减弱,共混物的结晶能力

下降。

共混物的扭矩曲线和流变性能曲线均显示,当共混物中仅加入GMA做增容剂时,共混物的相容性未得到明显改善,小分子GMA作为增塑剂仅提高了聚合物分子链段的运动能力;同时加入增容剂GMA和引发剂DCP的TPU/PLA共混物,其体系内可能发生扩链或交联现象,增加了分子链间的缠结作用,共混物的相容性得到明显改善,体系的熔体黏度随DCP含量的增加逐渐增加。

力学性能测试显示,仅加入GMA的TPU/PLA共混物冲击强度较未改性TPU/PLA共混物提高8.6%,但拉伸强度和拉伸模量下降。而GMA和DCP协同增容的TPU/PLA共混物的冲击强度进一步提升,当DCP质量分数为0.25%时制备的UAG5D共混物的力学性能最佳,相对于未改性的共混物拉伸模量和拉伸强度分别提高35.7%和186.7%,冲击强度提高86.0%。增容改性后的不对称PLLA/PDLA协同改性TPU/PLA共混物能够较好地实现刚韧性平衡。

参考文献

- [1] 李琬华. 热塑性聚氨酯复合材料摩擦性能及机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [2] 朱海彬, 朱涛, 张卫英, 等. 聚乳酸聚氨酯嵌段预聚体增韧PLA/TPU共混物[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 268-275.
- [3] 董朔宏, 王傲, 戴天承, 等. PTMG分子量对TPU微相分离结构和力学性能的影响[J]. 聚氨酯工业, 2024, 39(2): 19-23.
- [4] 郭楠, 苗威, 程玲玲, 等. 热塑性聚氨酯弹性体加强麻醉导管抗拉伸性能的试验研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(2): 127-131.
- [5] 曹刚, 李明昊, 左治江, 等. 纤维预紧力对聚氨酯同质增强复合材料力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 67-71.
- [6] 宋祖榜. 热塑性聚氨酯/石墨烯/碳纳米管柔性传感器的制备及其性能研究[D]. 福州: 福建理工大学, 2023.
- [7] 李凯泽, 辛勇. 改性碳纳米管增强热塑性聚氨酯复合材料的性能研究[J]. 中国塑料, 2022(6): 1-5.
- [8] 黄杨煜. 退火过程对不同对映体组成聚乳酸韧性作用机理的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [9] 杨皓文. 聚酯嵌段共聚物的制备与形状记忆性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [10] FLODBERG G, HELLAND I, THOMSSON L, et al. Barrier properties of polypropylene carbonate and poly(lactic acid) cast films[J]. European Polymer Journal, 2015, 63: 217-226.
- [11] 母广明. 聚乳酸改性复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
- [12] 陈志平, 冯羽凤, 陆春立, 等. 热塑性聚氨酯/聚乳酸共混材料的制备及性能表征[J]. 绝缘材料, 2020, 53(5): 13-17.
- [13] ZHANG L, YE Z C, HOU P L. Biodegradable PLA/TPU blends with improved mechanical properties[J]. Materials Letters, 2025, 387: 138205.
- [14] 张凌杰. 聚乳酸/热塑性聚氨酯合金的制备及性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2022.
- [15] 屈光亮. 基于互锁结构的PLA/TPU多层复合材料的制备与性能研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2025.
- [16] HAN J J, HUANG H X. Preparation and characterization of biodegradable polylactide/thermoplastic polyurethane elastomer blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(6): 3217-3223.
- [17] GUO R, REN Z C, BI H J, et al. Effect of toughening agents on the properties of poplar wood flour/poly(lactic acid) composites fabricated with fused deposition modeling[J]. European Polymer Journal, 2018, 107: 34-45.
- [18] DONG W Y, WANG H T, HE M F, et al. Synthesis of reactive comb polymers and their applications as a highly efficient compatibilizer in immiscible polymer blends[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(7): 2081-2089.
- [19] 司明广, 张国华, 郭晓聪, 等. TPU/TiO₂协同增韧增强PLA复合薄膜的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 88-93.
- [20] 刘瑞. 木质素接枝右旋聚乳酸/左旋聚乳酸复合膜的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [21] 陈鹏斐. 左旋聚乳酸/右旋聚乳酸共混体系多孔材料的制备及性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [22] 郭明威, 黄黎明, 赵志锋. 基于非对称聚乳酸共混物调控多重立构复合晶: 定量研究[J]. 高分子学报, 2024, 55(4): 473-484.
- [23] SUPANUT P, CATTALEEYA P. The effect of polylactic acid PLA/poly-D-lactide stereocomplex on the thermal and mechanical properties of various PLA/rubber blends[J]. Polymer International, 2020, 69(1): 41-49.
- [24] SU X L, JIA S K, CAO L, et al. High performance polylactic acid thermoplastic polyurethane blends with *in-situ* fibrillated morphology [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: e51014.
- [25] CAI K, LIU X, MA X S, et al. Preparation of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength by dynamic vulcanization process[J]. Polymer, 2024, 291: 126587.