

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.013

偏心轧辊密炼机制备PLA/PBS共混体系的性能

杨钰¹, 林旺阳¹, 陶淑², 郑苏洪¹

(1. 南华大学机械工程学院, 湖南衡阳 421001; 2. 南华大学数理学院, 湖南衡阳 421001)

摘要: 传统混炼过程以剪切应力为主导, 而正应力作用已被证实在高分子材料混合加工中具有独特优势, 本研究旨在探索混炼过程中强化正应力作用对聚合物复合体系的影响规律, 为剪切-正应力复合场的研究提供实践依据。通过将常规密炼机(CM)的轧辊转子设计成偏心结构, 使轧辊转子和内腔的间隙发生周期性变化, 从而强化混炼过程的正应力作用。利用该偏心轧辊密炼机(ERM)制备聚乳酸(PLA)/聚丁二酸丁二醇酯(PBS)共混体系, 系统研究正应力作用对PLA/PBS共混体系相容性和力学性能的影响。研究发现, ERM制备的PLA/PBS共混体系的力学性能、结晶度、加工性能及相形态都得到改善。相较于CM, ERM制备的PLA/PBS共混体系的断裂伸长率和冲击强度最高分别提升了28.8%和49.8%。其中, PLA/PBS质量分数配比为70/30的共混物力学性能综合提升最为显著, 该共混物中PLA的结晶度从49.1%提高至65.7%, 微观形貌则呈现出尺寸细化的PBS相和模糊的相界面。PLA/PBS共混体系力学性能的提升主要归因于ERM引入的正应力作用, 不仅强制分散PBS相、细化PBS颗粒尺寸, 还能促进分子链的伸展和有序排列, 从而有效改善两相界面作用并提升PLA的结晶能力。综上所述, ERM通过强化正应力作用, 实现了分散相尺寸的有效细化与界面性能的提升, 为改善聚合物共混体系的力学性能提供了可行途径。

关键词: 聚乳酸; 聚丁二酸丁二醇酯; 正应力; 分散; 韧性

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0105-08

Performance of PLA/PBS blends prepared by eccentric roller mixer

YANG Yu¹, LIN Wangyang¹, TAO Shu², ZHENG Suhong¹

(1. College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract : Traditional mixing process is dominated by shear stress, while normal stress has been proven to possess unique advantages in polymer processing. The influences of enhanced normal stress during mixing on the performances of polymer composites were investigated to provide a practical basis for research on shear-normal stress compound fields. The roller rotor of a conventional mixer (CM) was redesigned into an eccentric structure, causing the gap between the rotor and the inner cavity to change periodically, thereby enhancing the normal stress effects during mixing. Poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) (PLA/PBS) blends were prepared using this eccentric roller mixer (ERM) to systematically investigate the effect of normal stress on the compatibility and mechanical properties of the blends. The mechanical properties, crystallinity, processability, and phase morphology of PLA/PBS blends mixed by ERM are improved. Compared with CM, the PLA/PBS blends prepared by ERM exhibit an increase in elongation at break and impact strength up to 28.8% and 49.8%, respectively. Mechanical properties of the blend of 70 wt% PLA and 30 wt% PBS show the most significant overall improvement. The crystallinity of PLA in this blend increases from 49.1% to 65.7%, and the microstructure exhibits a refined PBS phase with a blurred phase interface. The improvement in mechanical properties of PLA/PBS blends can be attributed to the enhanced normal stress from ERM, which not only forces the dispersion of the PBS phase and refines its size, but also promotes the extension and ordered arrangement of molecular chains. This effectively improves the interfacial inter-

基金项目: 湖南省大学生创新训练计划一般项目(S202510555495), 南华大学大学生学术创新和创业发展支持计划项目(250XCX607), 南华大学博士科研启动基金(200XQD073)

通信作者: 林旺阳, 博士, 讲师, 研究方向为聚合物复合材料共混加工

收稿日期: 2026-01-03

引用格式: 杨钰, 林旺阳, 陶淑, 等. 偏心轧辊密炼机制备PLA/PBS共混体系的性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 105-112.

YANG Yu, LIN Wangyang, TAO Shu, et al. Performance of PLA/PBS blends prepared by eccentric roller mixer[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 105-112.

action between the two phases and the crystallization of PLA. Therefore, owing to the enhanced normal stress, ERM can refine the dispersed phase size and improve the two-phase interface, thereby enhancing the mechanical properties of the immiscible polymer blend.

Keywords: poly(lactic acid); poly(butylene succinate); normal stress; dispersion; toughness

自然资源的日渐枯竭和“限塑令”的出台,使得生物可降解高分子材料的研究与开发受到了广泛关注^[1]。目前已开发的各种生物基、可降解聚合物中,聚乳酸(PLA)是一种生物基脂肪族聚酯,具有优异的生物降解性、生物相容性、易加工性、高拉伸强度和高模量等优点^[2]。然而,PLA极差的韧性严重制约其在生物医学、食品包装和3D打印等领域的应用^[3]。作为另一种成熟的生物可降解聚合物,聚丁二酸丁二醇酯(PBS)却表现出与PLA完全相反的特性,PBS具有良好的柔韧性和热稳定性^[4]。因此,利用柔性的PBS增韧PLA,不仅能大幅度提高复合材料的韧性,还能保持PLA的可降解性^[5-6]。通过优化共混比例和特性,可定制材料性能和使用寿命,在包装^[7]、医疗^[8]等领域具有巨大的应用潜力,这推动了PLA/PBS共混体系的研究热潮。

然而,由于PLA的分子链存在刚性链段,其玻璃化转变温度(T_g)在60℃左右,而PBS的 T_g 处于-35℃左右,此外两者的晶体结构、结晶速率差异大,无法产生共结晶,这些因素导致PLA/PBS共混体系的相容性较差,会出现明显的相分离形态,导致共混体系的强度大幅度降低且韧性增幅小^[9]。虽然众多研究显示,反应型增容剂的引入能通过界面反应有效实现PLA/PBS体系的增容,获得超韧性的共混物^[10-11];然而强度、模量的降幅可能更大,且增容剂一般不可降解甚至具有毒性^[12]。因此,不引入第三相,仅通过改进共混工艺,提高PLA/PBS共混体系的相容性、保证共混体系的完全可生物降解性,是实现PBS增韧PLA的重要途径之一^[13]。

近年来,对共混方法的研究主要聚焦于振荡剪切和拉伸流变两种技术。振荡剪切技术是在熔融混合时对熔体施加周期性振动力场,形成剪切力-正应力复合力场^[14]。薛斌^[15]在三螺杆挤出机加工PLA/PBS共混体系中引入了振动力场,分散相受到周期性正应力作用变均匀、细化,共混体系的相容性提高,相形态呈现为共连续结构。结果表明,施加振动力场加工的共混体系的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度可提高15.7%、43.7%和24.5%。然而,振荡剪切作用的振幅、振频范围小,振动力场过

大时容易造成大量分子链断裂,从而大幅度降低体系的性能。

拉伸流变技术是利用熔融混合腔室的体积脉动变化产生拉伸形变作用,形成正应力为主导的力场,强迫物料被循环压缩、释放。Tan等^[16]利用拉伸流变技术制备了PLA/PBS复合材料,研究发现,PBS相呈现不同程度的拉伸变形,并均匀分布在PLA基体中,且两相界面模糊,形成两相互相穿插的共连续结构,从而提高了PBS和PLA的相容性。PLA/PBS质量分数配比(w/w)为60/40的样品,拉伸强度和拉伸弹性模量分别是纯PBS的1.4倍和6.9倍,断裂伸长率和冲击强度分别是纯PLA的5.7倍和9.7倍。然而,以正应力为主导的拉伸流变技术难以长效增容,复合体系的形态结构在后续成型中难以保持稳定,制约了拉伸流变技术的应用。

Huang等^[17]提出循环脉动压力增强分离结构(CPP-SS)新技术,能增强聚合物分子链的迁移能力和填料的分散能力。Rao等^[18]提出多重动态压力(MDP)工艺,通过调节压力的施加/释放产生动态拉伸效应,促使无序的分子链沿着动态力场的方向规则排列,从而形成更有序的晶型。经MDP处理后PLA的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了49.4%和10倍。CPP-SS和MDP技术都是在加工过程中施加正应力作用,使填料、分散相均匀分布在基体中,也促进基体相的分子链迁移和有序排列,进而提高复合体系的性能。然而,其工艺较为复杂,难以广泛应用。

综合振荡剪切技术中的剪切力-正应力复合力场和循环动态压力的显著优势,以及拉伸流变技术长效增容的不足,可发现剪切作用为主导、强化正应力为辅的复合力场,结合了剪切作用和正应力作用的优势,一方面能有效提高分散分布均匀性,另一方面能良好保持混炼效果。然而,常规轧辊转子的转子轮廓中心轴与转子轴的轴线(转子的转动中心)是共线的,在转子转动过程中,密炼机内腔与转子外轮廓之间的间隙固定不变,混炼过程中缺乏体积变化带来的正应力。

基于以上研究与分析,本文针对常规密炼机内

腔与转子外轮廓间隙固定、缺乏正应力作用的局限,设计了一种偏心转子结构。在偏心转子转动过程中,转子与密炼室内腔的周向间隙产生周期性变化,引入了循环性的压缩-释放体积效应,从而在拖曳剪切为主导的混炼过程中,强化了正应力作用。分别以常规密炼机和偏心轧辊密炼机为混合加工设备,制备 PLA/PBS 共混体系,研究两种密炼机制备的复合材料的力学性能、热学性能、流变行为和微观形貌,分析力学性能的变化规律以及其影响因素,为增容 PLA/PBS 共混体系提供一种可行的理论指导和技术途径。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA: 4032D, 密度为 1.24 g/cm^3 , T_g 为 57.8°C , 熔点为 160°C , 美国 Nature Works 公司;

PBS: FZ91PB, 密度为 1.26 g/cm^3 , T_g 约为 -30°C , 熔点为 115°C , 泰国 PTT MCC Biochem 公司。

1.2 主要仪器及设备

桌面密炼机: LKOI-03, 密炼机的密炼腔容积为 55 mL , 配有常规轧辊转子一对, 广州市普同实验分析仪器有限公司;

平板硫化机: XH-406CEW, 上海开特仪器有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): JSM-IT800, 日本电子株式会社(JEOL);

傅里叶红外光谱(FTIR)仪: Nicolet iS50, 美国赛默飞世尔科技公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC200, 日本日立高新技术公司;

简支梁冲击试验机: RXJ-50B, 深圳市瑞格尔仪器有限公司;

万能试验机: UTM2000, 深圳三思纵横科技股份有限公司;

旋转流变仪: MCR 302e, 奥地利安东帕(Anton Paar)公司。

1.3 密炼机偏心转子结构设计

图 1 为偏心轧辊密炼机结构示意图, 该结构中, 转子的轮廓中心轴与转动轴线不共线, 偏心距 $e=1 \text{ mm}$ 。常规密炼机(CM)和偏心轧辊密炼机(ERM)的结构参数见表 1。

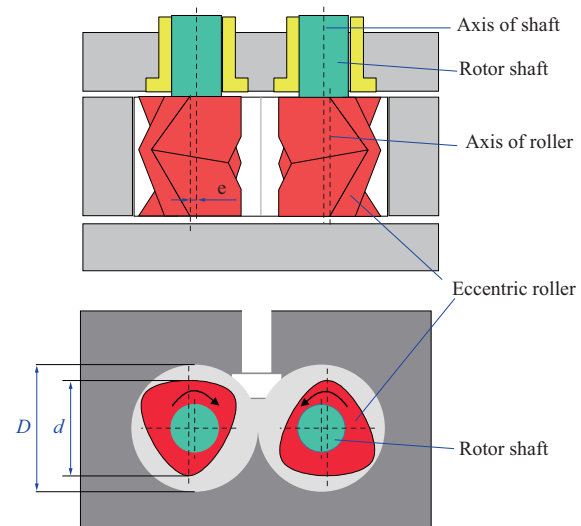


图 1 偏心轧辊密炼机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of eccentric roller mixer

表 1 混合装置的结构参数

Tab. 1 Structure parameters of mixing devices

Mixing device	d/mm	e/mm	D/mm
Conventional mixer(CM)	36.5	0	37.5
Eccentric roller mixer(ERM)	34.5	1	37.5

Notes: d is diameter of roller, e is eccentricity of roller, D is diameter of chamber.

1.4 试样制备

PLA、PBS 原料在真空干燥箱中在 80°C 下烘 8 h , 以去除原料中的水分。PLA/PBS 共混体系以 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 和 50/50 的比例(w/w)分别通过 CM 和 ERM 进行熔融共混加工。各配方在两种密炼机中的加工工艺参数均一致, 混合温度为 190°C , 转子转速为 50 r/min , 混合时间为 6 min 。获得的样品在 190°C 下预热 3 min , 随后排气 5 次, 然后在 190°C 和 10 MPa 下热压 5 min , 最后冷却 5 min , 以制备各种测试试样。

1.5 测试与表征

力学性能测试: 根据 GB/T 1040.2-2022, 在室温下利用万能试验机对 $80 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的哑铃型拉伸试样进行拉伸测试, 拉伸速度为 20 mm/min ; 根据 GB/T 1043-2008, 利用简支梁冲击试验机测定 $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的 V 型缺口试样的冲击强度, 摆锤能量为 7.5 J 。

流变性能测试: 圆形试样直径为 25 mm 、厚度为 1 mm ; 在温度为 190°C , 频率扫描范围为 $0.1 \sim 100 \text{ rad/s}$, 应变为 1% 条件下, 测定样品的储能模量(G')、损耗模量(G'')和复数黏度(η^*)。

DSC 分析: 在 50 mL/min 的 N_2 环境中, 取 $3 \sim$

5 mg 的样品在室温(25 °C)下以 10 °C/min 速率升温至 200 °C,并在该温度下维持 3 min 以消除热历史;然后以 10 °C/min 速率降温至室温,并在该温度下维持 3 min;最后,以 10 °C/min 速率二次升温至 200 °C。其中,结晶度 X_c 的计算公式见式(1)。

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_0 \times f} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为二次升温时的熔融焓; ΔH_{cc} 为二次升温时的冷结晶焓; ΔH_0 为纯组分的熔融焓,PLA 取 $\Delta H_{0,PLA}=93.6$ J/g, PBS 取 $\Delta H_{0,PBS}=110$ J/g; f 为 PLA 或 PBS 的质量百分数。

FTIR 分析:试样是经热压得到的约 100 μm 厚的薄膜,分辨率为 4 cm^{-1} ,波数范围为 500~4 000 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次。

SEM 形貌分析:长条形样条经过液氮浸泡 30 min 后,快速断裂得到平整的试样淬断面,然后对淬断面进行喷金处理,加速电压为 5 kV。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

2.1.1 拉伸性能

PLA/PBS 共混体系的拉伸性能如图 2 所示,随着 PBS 含量的增加,PLA/PBS 复合材料的拉伸强度和拉伸模量逐渐下降,而断裂伸长率呈现上升趋势,这是由于 PBS 加入降低了体系的刚性,提高了体系的柔韧性。对于同组分的 PLA/PBS 复合体系,ERM 制备复合材料的拉伸性能均高于 CM 制备的。

如图 2a 所示,ERM 对 PLA/PBS 复合体系的拉伸强度的提升并不显著,70/30 体系提高了 2.5%。如图 2b 所示,当 PBS 质量分数不超过 40% 时,ERM 的正应力作用增强了 PLA/PBS 复合体系的拉伸弹性模量,90/10 和 70/30 体系分别提高了 7.8% 和 7.2%。而 ERM 制备的复合体系断裂伸长率的提升主要表现在 80/20 和 70/30 组分,分别提高了 28.8% 和 21.9%,如图 2c。ERM 制备的复合体系性能的提升可归因于 ERM 中轧辊转子偏心距的存在,形成周期性变化的间隙(0.5~2.5 mm),强化了正应力作用,在混炼过程中产生动态的剪切力-正应力复合力场。有关研究指出,正应力作用能促进分散相的反复拉伸、破碎、聚结,进而细化分散相的尺寸^[19-21]。因此,ERM 提高了 PBS 相的分散均匀性,因而提升了体系的模量和柔性。然而,拉伸性能较小的提升幅度可

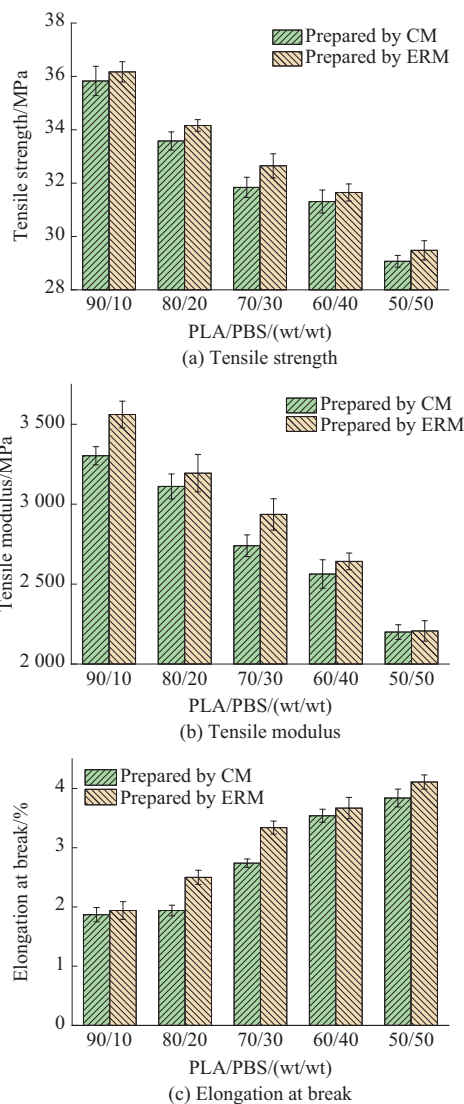


图2 PLA/PBS 共混体系的拉伸性能

Fig. 2 Tensile properties of PLA/PBS blends

能是由于 ERM 较小的偏心距(1 mm)带来的正应力作用有限,此外,轧辊转子外轮廓与密炼机内腔间的间隙(单边 0.5 mm)不利于正应力作用的产生。

2.1.2 冲击性能

随着 PBS 含量增加,PLA/PBS 共混体系的冲击性能呈现出与断裂伸长率相似的上升趋势,如图 3 所示,相比之下,ERM 制备的 PLA/PBS 复合体系的冲击性能明显提高。其中,提升率最高的为 60/40 体系的 49.8%,最低的 90/10 体系也提升了 11.7%。这可归因于 ERM 的强化正应力作用对共混体系分散相的强制细化作用,进而改善了两相的界面作用,共混物在受到冲击载荷时,一方面 PBS 相可以承受更多的应力作用,另一方面冲击能量更均匀地传导和吸收。

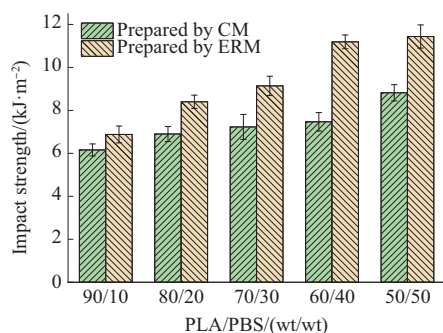


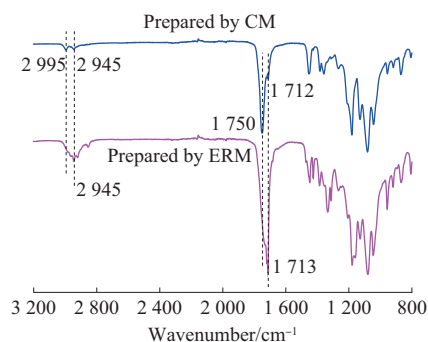
图3 PLA/PBS共混物的冲击强度

Fig. 3 Impact strength of PLA/PBS blends

综上,从共混体系的力学性能对比可以看出,ERM制备的PLA/PBS体系的力学性能呈现出不同程度的提升,尤其是冲击性能提升明显。而拉伸性能有限的提升幅度可能是因为相较于轧辊转子与密炼机内腔间的间隙(0.5 mm),偏心轧辊转子的偏心距(1 mm)过小,从而弱化了正应力的作用。总的来说,力学性能的结果证明了ERM在混炼复合体系中具有优势,其中70/30体系的力学性能综合提升最为明显。

2.2 FTIR 分析

图4为由CM和ERM制备的PLA/PBS (70/30)共混体系样品的FTIR谱对比,其中2 900~3 000 cm^{-1} 区域对应的是PLA或PBS的甲基(CH_3)或亚甲基(CH_2)的伸缩振动峰,1 700~1 750 cm^{-1} 区域对应的是PLA或PBS的酯羰基($\text{C}=\text{O}$)的伸缩振动峰。

图4 PLA/PBS(70/30)共混物的样品在800~3 200 cm^{-1} 范围内的FTIR吸收光谱Fig. 4 FTIR absorption spectra of specimens for PLA/PBS (70/30) blends in the ranges of 800 to 3 200 cm^{-1}

如图4所示,CM制备70/30体系样品的甲基/亚甲基伸缩振动峰处在2 995 cm^{-1} 和2 945 cm^{-1} ,分别对应了PLA的 CH_3 和PLA/PBS的亚甲基伸缩振动峰^[22],两个特征峰相对独立,说明两种基团之间的作用力弱。然而,ERM制备的样品的甲基/亚甲基峰集中至2 945 cm^{-1} 处,说明PLA的 CH_3 的伸缩振动

受到限制,或部分限制而弱化为 CH_2 的伸缩振动。此外,CM制备样品的 $\text{C}=\text{O}$ 峰处于1 750 cm^{-1} 和1 712 cm^{-1} ,分别对应了PLA和PBS的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰^[23],说明PLA和PBS的 $\text{C}=\text{O}$ 与羧基($-\text{COOH}$)之间的作用弱。而ERM制备样品的酯羰基峰集中在1 713 cm^{-1} 处,说明PLA的 $\text{C}=\text{O}$ 与PBS的 $-\text{COOH}$ 形成了分子间氢键作用^[24]。PLA的 CH_3 和 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰的消失,可归因为PBS的均匀分散促进了PBS分子链的伸展,并通过氢键结合或范德华力与PLA分子链相互作用,使得PLA分子链的 CH_3 、 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动受到PBS分子链的约束,也说明两相的界面作用力提高。

2.3 热学性能

图5为两种密炼机混炼的PLA/PBS (70/30)共混体系的DSC曲线和热学性能,共混体系的热学性能测试结果见表2。改变密炼机结构,样品的 T_g 、冷结晶、熔融温度、结晶度等都发生了变化。从图5的共混体系样品二次升温DSC曲线可看出,PLA的冷结晶峰、双熔融峰以及PBS的熔融峰的位置和形状均没有明显变化,说明正应力作用并没有改变PLA和PBS的晶型。

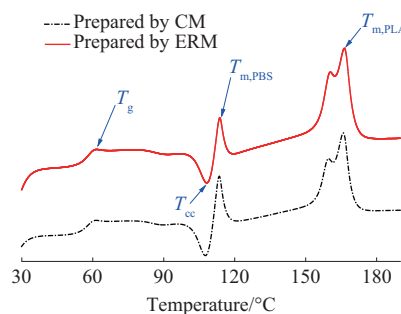


图5 PLA/PBS(70/30)共混物样品在二次升温过程的DSC曲线

Fig. 5 DSC curves during re-heating process of specimens for PLA/PBS (70/30) blends

此外,表2中ERM制备的共混体系中PLA的玻璃化转变温度($T_{g,PLA}$)、冷结晶温度($T_{cc,PLA}$)和熔融温度($T_{m,PLA}$)相比CM制备的样品提高了0.2~0.8 $^{\circ}\text{C}$ 。然而,PBS的熔融焓从10.56 J/g降低至6.53 J/g,对应的结晶度也从32%降低到19.8%。可归因于PBS的更均匀地分散在PLA相以及细化的形态,使得PBS分子链被PLA阻隔,不易堆叠、结晶^[16]。此外,PLA的冷结晶焓从11.35 J/g降低至9.4 J/g,说明ERM的正应力作用促进PLA分子链的伸展,在冷却过程中容易结晶,非晶区占比变小;这也可从PLA的熔融焓43.51 J/g增大至52.47 J/g中得到验证。因此,

表 2 PLA/PBS(70/30)共混物样品的热学性能
Tab. 2 Thermal properties of specimens for PLA/PBS (70/30) blends

Mixer	$T_{g,PLA}/^{\circ}C$	$T_{cc,PLA}/^{\circ}C$	$\Delta H_{cc,PLA}/(J/g)$	$T_{m,PLA}/^{\circ}C$	$T_{m,PBS}/^{\circ}C$	$\Delta H_{m,PLA}/(J/g)$	$\Delta H_{m,PBS}/(J/g)$	$X_{c,PLA}/\%$	$X_{c,PBS}/\%$
CM	61.4	107.6	11.35	159.7/165.9	113.5	43.51	10.56	49.1	32
ERM	61.7	108.2	9.4	160.5/166.3	113.7	52.47	6.53	65.7	19.8

Notes: $T_{g,PLA}$ is glass transition temperature of PLA; $T_{cc,PLA}$ is cold crystallization temperature of PLA; $\Delta H_{cc,PLA}$ is cold crystallization enthalpy of PLA; $T_{m,PLA}$ is melting temperature of PLA; $T_{m,PBS}$ is melting temperature of PBS; $\Delta H_{m,PLA}$ is melting enthalpy of PLA; $\Delta H_{m,PBS}$ is melting enthalpy of PBS; $X_{c,PLA}$ is crystallinity of PLA; $X_{c,PBS}$ is crystallinity of PBS.

PBS 的结晶度有所降低,但 PLA 的结晶度从 49.1% 增大至 65.7%,出现这种现象的原因可能是,PBS 相的尺寸细化不仅使其在 PLA 基体中分散均匀,也使 PBS 分子链的运动受到限制,因此 PBS 的结晶度降低;均匀分散的 PBS 促进了 PLA 分子链的运动^[25],并且分散的小颗粒 PBS 起到异相成核作用,从而促进 PLA 相的结晶^[26]。结晶度的提高使得复合材料能承受更大的外应力作用,对应了拉伸强度和拉伸模量的提高^[11]。

2.4 流变性能

图 6 呈现了 PLA/PBS (70/30)共混体系的流变行为,从中发现 ERM 制备的共混体系的储能模量、损耗模量和复数黏度均低于 CM 制备的体系。如图 6a 所示,PLA/PBS 复合体系的储能模量低于损耗模量,体现了共混体系的黏弹性行为^[23]。其中,ERM 制备共混物模压试样的储能模量降低,是因为在 ERM 强化正应力作用下,分子链更好地展开运动和

有序排列,减少了分子链之间的缠结和交联网络,从而降低了体系的弹性,在经历模压热历程后,其分子链的排列仍然有序。此外,损耗模量的降低也可归因于正应力作用促进了分子链的伸展,从而减少了分子链缠结,在经历模压热历程后,分子链缠结仍然未复现,分子链的运动阻力减低,减少了分子链间的内摩擦力^[26]。因此,ERM 制备复合材料的复数黏度也降低了,如图 6b 所示,黏度的降低说明 ERM 并不是通过提高 PLA 和 PBS 的交联或界面反应来改善共混体系性能的,更多的是通过细化 PBS 尺寸、强制分散 PBS 相以及伸展分子链等物理作用提高共混体系的性能。

2.5 微观形貌

图 7 为 PLA/PBS (70/30)共混体系的断面形貌。CM 制备的共混物的微观形态呈现出明显的相分离,而且 PBS 相粗大,表明 CM 制备的共混体系中 PLA 与 PBS 两相界面作用弱,如图 7a 所示。然而 ERM 制备的共混物的两相界面模糊,如图 7b 所示,表明 ERM 制备的共混物中 PBS 相更加均匀,使得两相界面模糊化,改善界面形态。

利用 ImageJ 软件统计了断面中 PBS 的粒径,如图 8a 所示,CM 制备的共混物中,PBS 的粒径主要集中于 1.5~3.5 μm 区间内,但也有较多的 PBS 粒径大于 7.5 μm ,最大粒径达到了 14.5 μm ,这使得 PBS 的平均粒径达到了 4.22 μm 。ERM 制备的共混物中 PBS 相的粒径分布在 0.5~7.5 μm 范围内,主要集中于 0.5~2.5 μm 区间,如图 8b 所示,PBS 的平均粒径

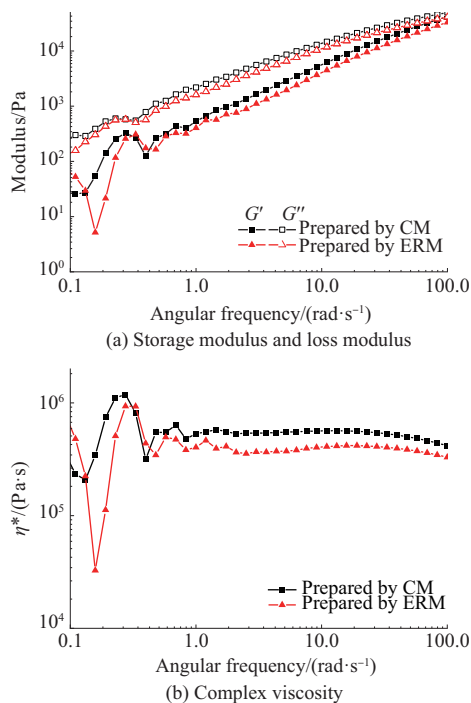


图 6 PLA/PBS(70/30)共混体系的流变行为曲线
Fig. 6 Rheological behavior curve of PLA/PBS (70/30) blends

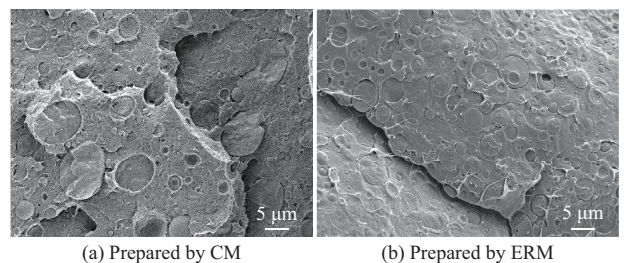


图 7 PLA/PBS(70/30)共混体系样品的微观形貌
Fig. 7 Micrograph of samples for PLA/PBS (70/30) blends

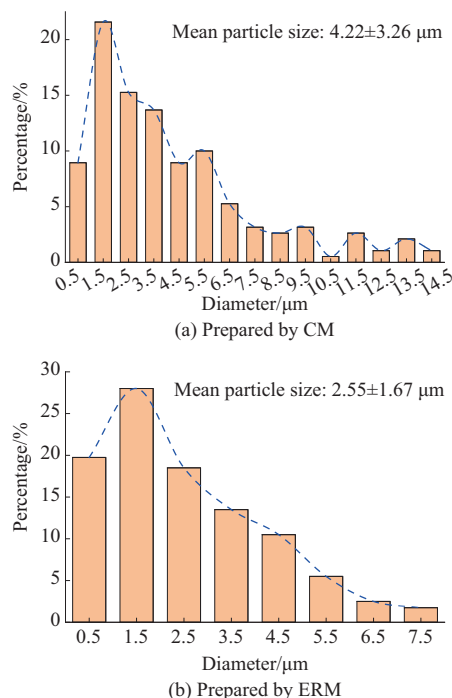


图8 PLA/PBS(70/30)共混体系样品中PBS的粒径分布图

Fig. 8 Particle size distribution of PBS in PLA/PBS (70/30) samples

仅为2.55 μm,说明PBS相的尺寸明显变小。这是由于ERM的特殊结构强化了混炼中的正应力作用,在两相熔融混合过程中强制分散PBS相,促进PBS的均匀分布。

3 结论

(1)相比CM,ERM制备的PLA/PBS共混体系的力学性能呈现不同程度的提升,其中,80/20体系的断裂伸长率提高了28.8%,60/40体系的冲击强度提高了49.8%,而70/30体系的力学性能综合提升最为明显。

(2)相比CM,ERM制备的70/30体系中PLA的结晶度从49.1%提高至65.7%;流变行为也显示共混体系的黏度降低;FTIR分析证明了体系中未发生反应;微观形态也观察到分散相PBS的尺寸细化、粒径分布窄、平均粒径小,说明PBS相分布更均匀,且与PLA的界面变得模糊。

(3)ERM在熔融混合中的强化正应力作用一方面能强制分散PBS相、细化了PBS相的尺寸,另一方面还能促进分子链的伸展与有序排列,有效改善两相界面作用和PLA的结晶,从而提高共混物的力学性能。

参考文献

[1] KUMAR A, MISHRA R K, VERMA K, et al. A comprehensive review of various biopolymer composites and their applications:

From biocompatibility to self-healing[J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 23. DOI:10.1016/j.mtsust.2023.100431.

[2] ALI W, ALI H, GILLANI S, et al. Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(3):1 761–1 786.

[3] NOFAR M, SACLIGIL D, CARREAU P J, et al. Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 125:307–360.

[4] BARLETTA M, AVERSA C, AYYOUB M, et al. Poly(butylene succinate)(PBS): Materials, processing, and industrial applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2022, 132. DOI: 10.1016/j.prog-polymsci.2022.101579.

[5] 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. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126214.

[6] LUDWICZAK J, DMITRUK A, SKWARSKI M, et al. UV resistance and biodegradation of PLA-based polymeric blends doped with PBS, PBAT, TPS[J]. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2023, 28(4):366–382.

[7] LAGAZZO A, MOLINER C, FINOCCHIO E, et al. Hydrolytic degradation and assessment of performance of PLA and PBS-based plastics designed for packaging applications[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2025(1). DOI:10.1155/ijps/5602847.

[8] ZHANG W, HAO M F, PENG H, et al. Fabrication of PBS/PLA/Fibroin-Agarose nerve guidance conduit with sandwich compression resistant wall structure for repairment of 10 mm-sciatic nerve defect[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505. DOI:10.1016/j.cej.2025.159312.

[9] DI LORENZO M L. Poly(l-lactic acid)/poly(butylene succinate) biobased biodegradable blends[J]. *Polymer Reviews*, 2021, 61(3): 457–492.

[10] SOMDEE P, SHETTAR M, PRASOETSOPHA N, et al. Reinforcing poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) biodegradable blends with silicon carbide (SiC): A silane-coupled approach for enhanced mechanical and thermal performance[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(14):12 624–12 635.

[11] GE T J, HE M, YU Y, et al. Preparation of PBS-g-IAH and the effect on the performance of PLA/PBS composite[J]. *Journal of Polymer Research*, 2025, 32(5). DOI: 10.1007/s10965-025-04391-3.

[12] 陶淑,林旺阳.增容PLA/PBS共混体系的研究进展[J].*工程塑料应用*, 2025, 53(11):219–228.

TAO Shu, LIN Wangyang. Research progress on compatibilizing PLA/PBS blends[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53 (11):219–228.

[13] ZHAO X P, ZHANG D F, YU S T, et al. Recent advances in

- compatibility and toughness of poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blends[J]. *e-Polymers*, 2021, 21(1):793–810.
- [14] 秦森,何和智,张涛,等. 塑料体积脉动注射成型技术研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(9):96–101.
- QIN Sen, HE Hezhi, ZHANG Tao, et al. Study on volume-pulsation injection-molding technology for plastics[J]. *China Plastics*, 2023, 37(9):96–101.
- [15] 薛斌. 基于振动力场作用下三螺杆挤出聚乳酸基材料混合机理及其结构性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- XUE Bin. Study on the mixing mechanism and properties of poly(lactic acid)-based materials processed by tri-screw extruder under the effect of vibration field[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [16] TAN L C, QU J P. Characterization of poly(butylene succinate)/poly(lactic acid) blends with *in-situ* sub-micron fibers and intercalation structure manufacturing by volumetric pulsating elongation flow[J]. *Polymer Testing*, 2019, 77. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.05.005.
- [17] HUANG Y Z, LIU X X, LI L W, et al. Cyclic pulsating pressure enhanced segregating structuration of ultra-high molecular weight polyethylene/graphene composites as high-performance lightweight EMI shields[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2024, 42(7):958–967.
- [18] RAO W X, LI L W, ZHANG S H, et al. Simultaneous improvement of strength and toughness of poly(lactic acid) via multiple dynamic pressure[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2025, 43(9):1 602–1 615.
- [19] LI J Q, HE H Z, ZHU Z W, et al. Unique morphology of polylactide/poly(ϵ -caprolactone) blends extruded by eccentric rotor extruder[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(10):4 252–4 262.
- [20] ZHANG H H, WEI X Z, QU J P. Microstructure evolution and mechanism of PLA/PVDF hybrid dielectrics fabricated under elongational flow[J]. *Polymer*, 2021, 224. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123719.
- [21] ARRIGO R, MALUCELLI G, LA MANTIA F P. Effect of the elongational flow on the morphology and properties of polymer systems: A brief review[J]. *Polymers*, 2021, 13(20). DOI: 10.3390/polym13203529.
- [22] UCPINAR B, SIVRIKAYA T, AYTAC A. Sustainable hemp fiber reinforced polylactic acid/poly(butylene succinate) biocomposites: Assessing the effectiveness of MAH-g-PLA as a compatibilizer[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(10):9 438–9 453.
- [23] CHOI I S, KIM Y K, HONG S H, et al. Effects of polybutylene succinate content on the rheological properties of polylactic acid/polybutylene succinate blends and the characteristics of their fibers[J]. *Materials*, 2024, 17(3). DOI: 10.3390/ma17030662.
- [24] 王乙富, 王建柱, 张正贵. 可生物降解的 PLA-PBS 共混物的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2025, 56(11):11 099–11 107.
- WANG Yifu, WANG Jianzhu, ZHANG Zhenggui. Preparation and properties of biodegradable PLA-PBS blend[J]. *Journal of Functional Materials*, 2025, 56(11):11 099–11 107.
- [25] CAI H J, CAO C L, ZHENG Y L, et al. A facile strategy for compatibilization of PLA/PBS blends by incorporating camellia seed powder[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023, 308(5). DOI: 10.1002/mame.202200581.
- [26] ZHAO T, YU J S, ZHANG X Y, et al. Thermal, crystallization, and mechanical properties of polylactic acid (PLA)/poly(butylene succinate)(PBS) blends[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(3):2 481–2 504.