http://pmse.scu.edu.cn

Lyocell 纤维增强聚乳酸/聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯复合材料的结构与性能

李正择，娄 骏，杨革生，张慧慧
（先进纤维材料全国重点实验室 东华大学材料科学与工程学院，上海 201620）

摘要：以聚乳酸（PLA）和聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯（PBAT）为基体，新型再生纤维素纤维 Lyocell 纤维为增强纤维，采用熔融共混和注塑成型制备了 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料，通过力学性能测试、差示扫描量热分析、热重分析、动态力学热分析、扫描电镜、维卡软化温度等方法研究了 Lyocell 纤维含量对复合材料结构与性能的影响。结果表明，采用 Lyocell 纤维增强可有效提高 PLA/PBAT 复合材料的结晶度、力学性能和维卡软化温度。随着 Lyocell 纤维含量提高，Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的性能先提高后降低，当 Lyocell 纤维含量为 20% 时，纤维在基体中分散较均匀，玻璃化转变温度最高，复合材料的综合性能最佳，拉伸强度、弹性模量和悬臂梁缺口冲击强度比 PLA/PBAT 复合材料分别提高了 41.6%，81.3% 和 90.6%，维卡软化温度达到 128.4 ℃，比 PLA/PBAT 复合材料提高了 66.8 ℃。

关键词：生物可降解；聚乳酸；聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯；Lyocell 纤维；复合材料
中图分类号：TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2025)12-0032-08

近年来，废弃的不可降解聚合物产品给环境造成了严重的污染，无法满足国家对环保的重大需求，因此，开发绿色环保的生物可降解高分子材料已成为重要的研究热点。聚乳酸（PLA）和聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯（PBAT）是最具代表性的 2 种生物可降解聚合物。

PLA，又称聚丙交酯，是一种集生物降解性、生物相容性和生物可吸收性于一体的绿色热塑性聚酯，具有高强度、透明和易成型加工等优点[1,2]，广泛应用于医疗卫生、农业、纺织服装、工业包装等领域，被认为是迄今为止最具市场潜力的可生物降解聚合物[3]。然而，PLA 刚而脆，耐抗冲击性较差，对 PLA 进行改性以提高其韧性，已成为近年来的研究热点。

PBAT 是己二酸丁二醇酯（PBA）和对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）的共聚物[4]，具有宽熔点、高柔韧性（断裂伸长率 ≥ 600%）的特点。PBAT 在自然界中可实现完全生物降解[5]，具有良好的可加工性和耐热性。将具有优异韧性的 PBAT 与 PLA 共混制备生物可降解复合材料，可提高 PLA 的冲击强度和断裂伸长率，改善其韧性，但同时其拉伸强度和模量会降低较多。

Yeh[6] 和 Kumar 等[7] 均发现随着 PBAT 含量的增加，PLA/PBAT 复合材料的韧性显著改善，但拉伸强度逐渐下降。因此，在保持 PLA/PBAT 复合材料韧性的基础上，可以利用纤维增强来进一步提高复合材料的拉伸强度。

Wu 等[8] 以剑麻纤维（SF）为增强纤维，以商业化的环氧官能化低聚物 Joncryl ADR-4368 为增容剂，制备了 PLA/PBAT/SF 复合材料。研究发现，PLA/PBAT/SF 复合材料的韧性较纯 PLA 得到了显著提高，拉伸强度得到了很好的保持。

Lyocell 纤维作为新一代纤维素纤维，是强度最高的纤维素纤维之一，与普通的聚酯纤维相当。而且相比天然纤维素纤维，Lyocell 纤维还具有质量可控，均匀性好，韧性高等优点，用 Lyocell 纤维作为增

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0218
收稿日期: 2024-10-31
通讯联系人: 张慧慧，主要从事纤维素纤维及生物质复合材料的研究，E-mail: hhzhang@dhu.edu.cn

强材料已有较多报道且具有较好的增强效果[9]。本文以 Lyocell 纤维为增强材料,通过熔融共混及注塑成型法制备了 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料,探讨了 Lyocell 纤维含量对 PLA/PBAT 复合材料结构与性能的影响。

1　实验部分

1.1　实验原料

PLA 切片:熔点 T_m = 164.4 ℃,道达尔公司;PBAT 切片:T_m = 116.8 ℃,江苏苏美达集团;相容剂:Joncryl ADR4368,德国巴斯夫公司;Lyocell 短纤:38 mm,单丝强度为 3.47 cN/dtex,奥地利 Lenzing 公司。

1.2　复合材料的制备

将 Lyocell 纤维剪成长度约为 2 mm 的短纤维,然后将纤维、相容剂与 PLA、PBAT 切片一起放入真空烘箱中,在 70 ℃干燥 10 h。将干燥后的原料一起加入到 Rheocord90 型转矩流变仪(德国 HAAKE 公司)的密炼腔中,其中 PLA 与 PBAT 的质量比为 7∶3,相容剂 ADR4368 质量分数为 1%,Lyocell 纤维添加量分别占总质量的 10%,20% 和 30%,然后在 185 ℃以 50 r/min 的转速熔融共混 3 min。再进一步采用 DHY-5 型微型注塑机(上海德弘橡塑机械有限公司)制成 10 cm×10 cm×3 mm 的板材,利用裁刀制成所需拉伸和冲击样条。注塑参数为:注塑料筒温度 185 ℃,模具温度 50 ℃,注塑压力 0.5 MPa,注射时间 10 s,保压时间 8 s。

1.3　复合材料测试及表征

1.3.1　力学性能测试

(1)拉伸性能:根据国标 GB/T 1447—2005,采用 WDW3020 型微控电子万能试验机(长春科新实验仪器有限公司)对复合材料进行拉伸试验。拉伸速率为 2 mm/min。

(2)冲击性能:根据国标 GB/T 1843—2008,采用 XWZY 型万能制样机(承德市考思科学检测有限公司)对复合材料样条制备缺口,然后采用 XJJUD-50Q 型摆锤冲击仪(承德市考思科学检测有限公司)对复合材料冲击样条进行悬臂梁缺口冲击试验。

上述力学性能试验每个样品均重复测试 5 次,结果取平均值。

1.3.2　DSC 分析及结晶度计算:采用 Q20 型差示扫描量热仪(美国 TA 仪器公司)对复合材料进行热性能分析。在 50 mL/min 的 N_2 气氛下,以 10 ℃/min 的升温速率,将试样从 20 ℃升温至 200 ℃,恒温 3 min 消除热历史,以 10 ℃/min 的降温速率降至 20 ℃,最后以 10 ℃/min 的升温速率升至 200 ℃,记录样品二次升温热焓随温度的变化曲线,获得熔融温度、冷结晶温度(T_{CC})、熔融热焓(ΔH_m)和冷结晶焓(ΔH_{cc})等参数。根据式(1)计算得到 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料中 PLA 的结晶度(X_C)[10]

$$X_C = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{CC}}{\varphi \times \Delta H_m^0} \quad (1)$$

式中:ΔH_m——PLA 的熔融热焓,J/g;ΔH_{CC}——PLA 的冷结晶焓,J/g;φ——复合材料中 PLA 的质量分数;ΔH_m^0——完全结晶的 PLA 熔融热焓,93 J/g。

1.3.3　热重分析:采用德国 NETZSCH 公司的 TG 209 型热重分析仪(TGA)测定复合材料的热稳定性能。将一定量的试样在 50 mL/min 的 N_2 气氛保护下,以 10 ℃/min 的升温速率将样品从室温升至 600 ℃,记录试样受热质量损失情况。

1.3.4　动态力学热分析:采用梅特勒公司的 DMA1 型动态力学热分析仪(DMA)对复合材料进行动态力学热性能测试。采用双悬臂梁模式测试,样品尺寸为 30 mm×10 mm×4 mm。将试样以 1 Hz 的振动频率、2 ℃/min 的升温速率从室温加热到 200 ℃,测试复合材料的储能模量、损耗模量和损耗因子($\tan\delta$)等参数随温度的变化。

1.3.5　微观形貌分析:采用日本 HITACHI 公司的 S-4800 型扫描电子显微镜(SEM),对复合材料拉伸测试后试样的断面微观形貌结构进行观察。测试前对样品进行真空喷金处理。

1.3.6　维卡软化温度测试:采用德国 COESFELD 公司的 IC 6+N 型热变形 &维卡软化温度测定仪,按照国标 GB/T 1633—2000,测试复合材料的维卡软化温度。测试载荷为 1 kg,升温速率为 2 ℃/min。

2　结果与讨论

2.1　力学性能分析

Fig.1 是 Lyocell 纤维含量对 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料拉伸强度和弹性模量的影响。由

Fig.1 可知,与 PLA/PBAT 复合材料相比,Lyocell 纤维增强的复合材料的拉伸性能得到提高,这主要是由于纤维在 PLA/PBAT 复合材料基体中发挥了较好的增强作用,受到外力时,纤维能有效吸收传递作用力,因此,复合材料的拉伸性能有所提高。此外,随着 Lyocell 纤维含量逐渐增加,复合材料的拉伸强度和弹性模量先增加,当 Lyocell 纤维含量为 20% 时,复合材料的拉伸性能达到最佳,其拉伸强度和弹性模量比 PLA/PBAT 复合材料分别提高了 41.6% 和 81.3%。但是当 Lyocell 纤维含量过高(30%)时,复合材料的拉伸性能有所下降,这可能是由于过多的 Lyocell 纤维在 PLA/PBAT 复合材料基体中分散不均匀,使得纤维部分团聚,由此形成应力缺陷所造成的。

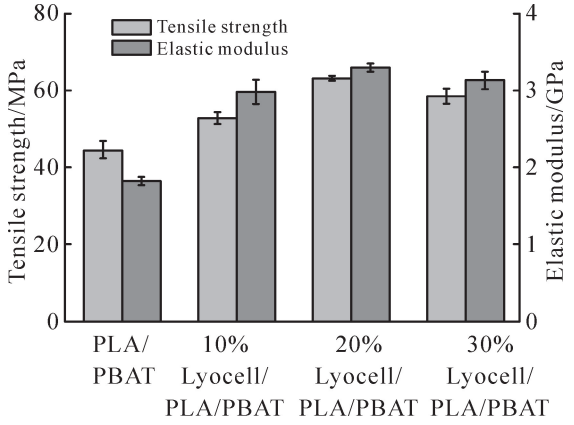


Fig. 1 Effect of Lyocell fiber content on tensile properties of Lyocell/PLA/PBAT composites

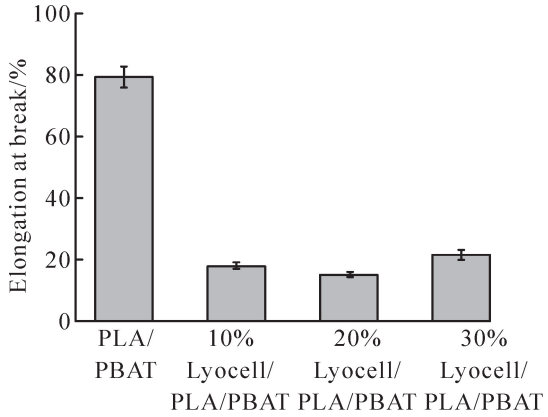


Fig. 2 Effect of Lyocell fiber content on elongation at break of Lyocell/PLA/PBAT composites

Fig.2 是 Lyocell 纤维含量对 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料断裂伸长率的影响。由 Fig.2 可知,由于韧性材料 PBAT 的加入,PLA/PBAT 复合材料的断裂伸长率高达 79.4%,即使是在添加 Lyocell 纤维后,复合材料的断裂伸长率仍然>15%,比纯 PLA 高 10% 左右[11]。

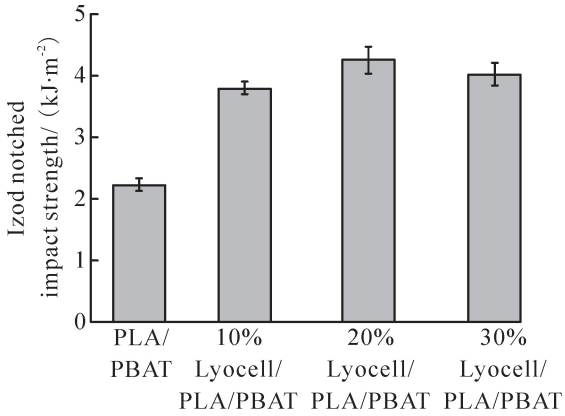


Fig. 3 Effect of Lyocell fiber content on Izod impact strength of Lyocell/PLA/PBAT composites

Fig.3 为 Lyocell 纤维含量对 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料悬臂梁缺口冲击强度的影响。由 Fig.3 可知,Lyocell 纤维增强复合材料的悬臂梁缺口冲击强度显著提高,这可能是因为 Lyocell 纤维增强后复合材料受到外力载荷冲击时,纤维被拔出,可以吸收分散更多的冲击能量,从而使得复合材料的韧性大幅增加,其中,当 Lyocell 纤维含量为 20% 时,复合材料的韧性最好,其悬臂梁缺口冲击强度达到 4.25 kJ/m^2,比 PLA/PBAT 复合材料提高了 90.6%。

2.2 DSC 分析

Fig.4 为不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的 DSC 二次升温曲线,相关的热性能数据及计算的结晶度列于 Tab.1 中。由 Fig.4 可知,不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材

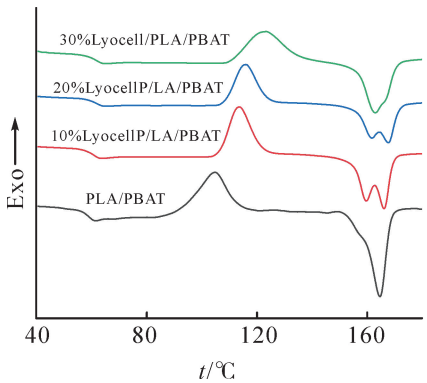


Fig. 4 DSC curves of Lyocell/PLA/PBAT composites with different Lyocell fiber contents

料的熔点变化不大,说明在成型工艺过程中,PLA/PBAT 复合材料没有发生明显的热降解。值得注意的是,PLA/PBAT 复合材料仅呈现 1 个熔融温度(164.5 ℃),但是当 Lyocell 纤维含量为 10% 和 20% 时,Lyocell/PLA/PBAT 复合材料出现了双熔融峰,这是由于在升温过程中发生了熔融重结晶的原因;当 Lyocell 含量继续增大到 30% 时,Lyocell/PLA/PBAT 复合材料又出现了单熔融峰。这可能是因为在未加入 Lyocell 纤维之前,复合材料的结晶比较完善,所以没有出现双熔融峰。添加 Lyocell 纤维使得结晶过程中形成很多不完善的晶体,这些晶体在升温过程中容易链段重排和重新结晶,从而出现了双熔融峰的现象[12]。Lyocell 纤维添加量进一步增加,起到成核剂作用,加快复合材料中 PLA 的结晶速率,使复合材料的晶体结构逐渐趋于完善,导致双熔融峰转变为单熔融峰。

Tab. 1　DSC data of Lyocell/PLA/PBAT composites with different Lyocell fiber contents

Samples	T_{CC}/℃	T_m/℃	ΔH_{CC}/(J·g^{-1})	ΔH_m/(J·g^{-1})	ΔH_C/(J·g^{-1})	X_C/%
PLA/PBAT	104.9	164.5	16.54	19.92	3.38	5.19
10% Lyocell/PLA/PBAT	112.1	159.5/166.0	13.58	17.78	4.20	7.17
20% Lyocell/PLA/PBAT	116.3	161.7/167.5	10.46	16.53	6.07	11.66
30% Lyocell/PLA/PBAT	122.7	162.2	13.87	19.10	5.23	11.48

此外,由 Fig.4 和 Tab.1 可知,PLA/PBAT 复合材料中 PLA 结晶度随着 Lyocell 纤维含量的增加而提高,其原因可能是 Lyocell 纤维在 PLA/PBAT 复合材料基体中起到了类似“成核剂”的作用,提高了 PLA 的成核结晶速率,使得复合材料中 PLA 结晶度相应提高。但当 Lyocell 纤维含量增至 20% 以上时,复合材料结晶度变化不大,甚至略有降低,这可能是由于 Lyocell 纤维含量过多,发生部分团聚缠结,因此成核效果减弱,结晶度略有降低。复合材料结晶度随 Lyocell 纤维含量的变化趋势与前述力学性能的变化趋势相符合。

2.3　热重分析

Fig.5 为不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的 TGA 和 DTG 曲线图。由 Fig.5 可以看出,Lyocell 纤维的添加使得 PLA/PBAT 复合材料的热分解温度略有降低。这主要是由于 Lyocell 纤维是一种再生纤维素纤维,一般在 280 ℃左右开始发生热分解[13],热分解温度比 PLA/PBAT 复合材料低,因此,Lyocell 纤维添加后复合材料的热分解温度有所降低,耐热性能下降,残余质量增加。对比不同 Lyocell 纤维含量的复合材料可知,随着 Lyocell 纤维含量提高,复合材料的热分解温度逐渐降低,当 Lyocell 纤维含量增加至 30%时,与 PLA/PBAT 复合材料的热分解温度相比降低了将近 40 ℃,而残余质量与 Lyocell 纤维的添加量成正比。

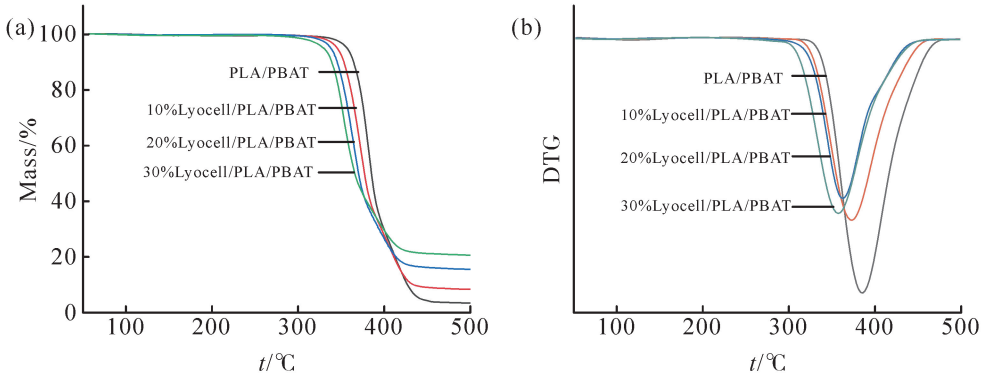


Fig. 5　(a) TGA and (b) DTG curves of Lyocell/PLA/PBAT composites with different Lyocell fiber contents

2.4 动态力学性能分析

Fig.6 为不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的动态力学性能变化图，数据列于 Tab.2 中。储能模量表征材料在变形过程中由于弹性形变而贮存的能量，反映材料黏弹性中的弹性部分。储能模量越大，材料的刚性越大，越不容易变形。从 Fig.6(a)可知，在较低温度时，PLA/PBAT 复合材料为玻璃态，分子链段运动被冻结，储能模量保持较高的值。与 PLA/PBAT 复合材料相比，Lyocell 纤维的加入使得复合材料的初始储能模量显著增大，当 Lyocell 纤维添加量为 30% 时，复合材料的初始储能模量提高了 170%。随着温度的提高，当温度达到 PLA/PBAT 复合材料的玻璃化转变温度时，PLA/PBAT 分子链段可自由运动，因此，储能模量迅速下降，并达到最低点。当温度升至 100~110 ℃以后，随温度继续升高，储能模量开始小幅上升，这主要是由于升温过程中复合材料发生冷结晶所导致的。由前述 DSC 结果也可知，Lyocell 纤维的加入使得复合材料的结晶度增加，这会使材料的刚度增加，宏观上表现为材料储能模量的增加。

损耗模量反映材料的黏性大小，损耗模量峰强度越高，说明材料黏性越大，能量耗散越多。由 Fig.6(b)可知，随着 Lyocell 纤维含量增加，PLA/PBAT 复合材料的损耗模量逐步增加，表明在受到外力作用时，复合材料可以分散消耗更多的能量来抵抗外力所导致的形变。

损耗因子为损耗模量与储能模量的比值，其峰强度值反映了聚合物随温度升高发生松弛运动的分子链段数目，体现了聚合物分子链的运动能力。从 Fig.6(c)中可以看到，Lyocell 纤维的加入使得 PLA/PBAT 复合材料的 tan δ 峰强度值逐步降低。这是因为 Lyocell 纤维的加入减少了复合材料的自由体积，降低了其流动性。tan δ 峰值所对应的温度即玻璃化转变温度。Lyocell 纤维增强后复合材料的 T_g 有所增大，这说明 Lyocell 纤维的加入使复合材料分子链段间作用变得更强，其中 Lyocell 纤维含量为 20% 时，复合材料的玻璃化转变温度最高，比 PLA/PBAT 复合材料的 T_g 提高 9.55 ℃。

综合 DMA 结果来看，Lyocell 纤维有利于提高 PLA/PBAT 的动态力学性能，20% Lyocell/PLA/PBAT 复合材料具有最高的玻璃化转变温度，在高温(55~100 ℃)下的动态力学性能也最好。

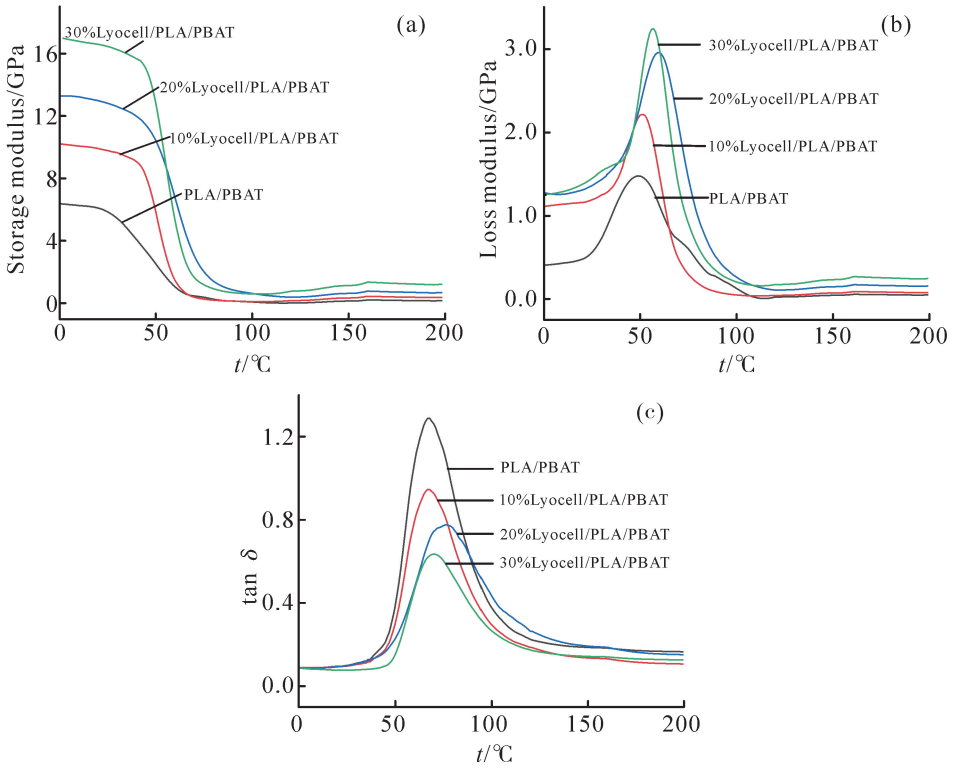


Fig. 6 DMA curves of Lyocell/PLA/PBAT composites with different Lyocell fiber contents: (a) storage modulus; (b) loss modulus; (c) tan δ

Tab. 2　DMA data of Lyocell/PLA/PBAT composites with different Lyocell fiber contents

Samples	Initial storage modulus /GPa	Peak loss modulus /GPa	tan δ peak temperature /℃	tan δ peak value
PLA/PBAT	6.13	1.49	66.87	1.294
10% Lyocell/PLA/PBAT	10.02	2.21	68.24	0.903
20% Lyocell/PLA/PBAT	13.12	2.93	76.42	0.725
30% Lyocell/PLA/PBAT	16.88	3.27	71.54	0.611

2.5　微观形貌分析

Fig.7 是不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料拉伸断面的 SEM 图。如 Fig.7(a)所示,由于加入了高韧性的 PBAT,PLA/PBAT 复合材料拉伸断面处有大量微纤拔出,表现为纤维状断面,是典型的韧性断裂。而不同 Lyocell 纤维含量的 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料断面的微纤现象减少(见 Fig.7(b~d)),当 Lyocell 纤维含量较高时,部分纤维被拔出,纤维周围与基体间空隙较多,纤维表面光滑,表明纤维与基体的界面相容性还有待提高。

从 Fig.7 还可见,当 Lyocell 纤维添加量较少时,Lyocell 纤维在 PLA/PBAT 复合材料基体中分布较为稀疏(如 Fig.7(b)所示),其增强作用效果发挥不显著;当 Lyocell 纤维添加量适当,其在基体中分布均匀(如 Fig.7(c)所示),有利于起到有效地增强效果;而当 Lyocell 纤维添加量过多时,其在基体中分布不均,甚至导致局部团聚,易造成较明显的结构缺陷(如 Fig.7(d)所示),从而会导致 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料力学性能下降。由此可见,当 Lyocell 纤维添加量为 20% 时,Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的界面结合相对较好,结合前述力学性能等分析结果可知,20% Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的综合性能较佳。

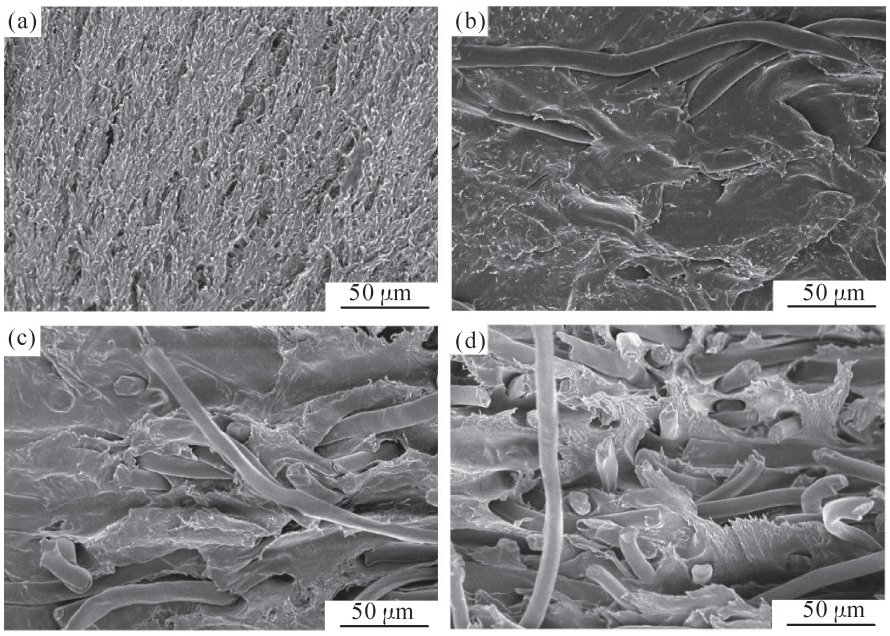


Fig. 7　SEM images of fracture surfaces of (a) PLA/PBAT, (b) 10% Lyocell/PLA/PBAT, (c) 20% Lyocell/PLA/PBAT and (d) 30% Lyocell/PLA/PBAT composites

2.6　维卡软化温度

Fig.8 为 Lyocell 纤维含量对 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料维卡软化温度的影响。作为评价材料热性能与产品质量的一个重要指标,维卡软化温度越高,则材料的耐热形变能力越好。从 Fig.8 可以看出,PLA/PBAT 复合材料的维卡软化温度仅为

61.6 ℃,与纯 PLA 材料相当[14],而 Lyocell 纤维增强后,Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的维卡软化温度大幅提高,说明 Lyocell 纤维本身所具有的优秀耐热性有助于提升 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料的整体耐热形变性。当 Lyocell 纤维添加量为 20% 时,复合材料的维卡软化温度达到最高,为 128.4 ℃,与 PLA/PBAT 复合材料相比提高了 66.8 ℃。但随着 Lyocell 纤维添加量继续提高到 30% 时,复合材料的维卡软化温度有所降低(121.2 ℃),这可能是因为 Lyocell 纤维添加量过多,Lyocell 纤维产生部分缠结,导致 Lyocell 纤维与 PLA/PBAT 基体的成核位点减少,造成 PLA/PBAT 复合材料的结晶度略有下降,使得复合材料的维卡软化温度略有降低,这与前述 DSC 结果相一致。

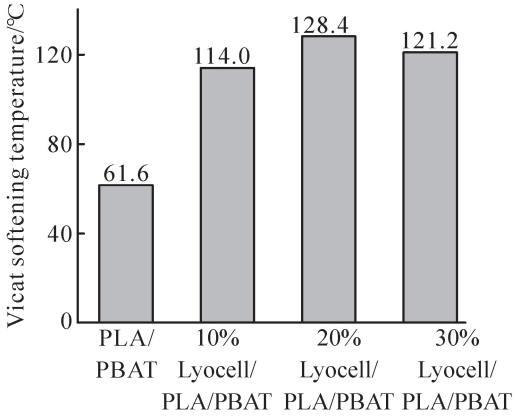


Fig. 8 Effect of Lyocell fiber content on Vicat softening temperature of Lyocell/PLA/PBAT composites

3 结论

本文通过熔融共混和注塑成型成功制备了 Lyocell/PLA/PBAT 复合材料,分析了 Lyocell 纤维含量对复合材料结构与性能的影响。结果表明,复合材料的力学性能随着 Lyocell 纤维含量的增加先提高后降低,当 Lyocell 纤维含量为 20% 时,复合材料的力学性能最佳,其拉伸强度和冲击强度分别提高了 41.6% 和 90.6%。Lyocell 纤维在复合材料中起到了成核剂作用,提高了材料结晶度。当 Lyocell 纤维含量为 20% 时,复合材料的结晶度最高,维卡软化温度达到了 128.4 ℃,相较 PLA/PBAT 复合材料提高了 66.8 ℃。Lyocell 纤维增强后,PLA/PBAT 复合材料断面的微纤拔出现象减少。当 Lyocell 纤维添加量为 20% 时,其在基体中分布均匀,界面结合相对较好。本文以绿色纤维 Lyocell 替代天然麻类纤维作为增强纤维,具有均匀性好,韧性高等优点,为生物可降解 PLA/PBAT 材料的同步增强增韧提供了新思路。

参考文献:

[1] Wang X, Huang L, Li Y, *et al*. Research progress in polylactic acid processing for 3D printing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 112: 161-178.

[2] Pens C J D S, Klug T V, Stoll L, *et al*. Poly (lactic acid) and its improved properties by some modifications for food packaging applications: a review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 41: 101230.

[3] Taib N A A B, Rahman M R, Huda D, *et al*. A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer[J]. Polymer bulletin, 2023, 80: 1179-1213.

[4] 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.

[5] 陈文君. 以 PBAT 为基材的活性包装薄膜制备及其在双孢菇保鲜中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
Chen W J. Preparation of active packaging film based on PBAT and its application in preservation of white mushroom[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.

[6] Yeh J T, Tsou C H, Huang C Y, *et al*. Compatible and crystallization properties of poly (lactic acid)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116: 680-687.

[7] Kumar M, Mohanty S, Nayak S K, *et al*. Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites[J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 8406-8415.

[8] Wu H, Hao M. Strengthening and toughening of polylactide/sisal fiber biocomposites via in-situ reaction with epoxy-functionalized oligomer and poly (butylene-adipate-terephthalate)[J]. Polymers, 2019, 11: 1747-1753.

[9] 葛昭, 于敏敏, 钱进, 等. PLA/Lyocell 纤维复合材料结构与性能研究[J]. 塑料科技, 2014, 42(10): 92-96.
Ge Z, Yu M M, Qian J, *et al*. Study on structure and properties of PLA/Lyocell fiber composites[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(10): 92-96.

[10] 李桂丽, 冯巧, 陈树芳, 等. 碳纳米管选择性分布增韧聚乳酸/

聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯共混材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(7): 63-69.
Li G L, Feng Q, Chen S F, *et al*. Selective localization of carbon nanotubes in poly (lactic acid)/poly (butyleneadpipate-co-terephthalate) blends with improved toughness[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(7): 63-69.

[11] 郝亚敞. 加工助剂对聚乳酸力学性能的影响[J]. 塑料助剂, 2024(2): 20-23.
Hao Y T. Effect of processing aids on the mechanical properties of polylactic acid[J]. Plastics Additives, 2024, (2): 20-23.

[12] 齐仲宇. 玉米秸秆/聚乳酸复合材料的构筑与性能优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Qi Z Y. Research on construction and optimization of corn straw/polylactic acid composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.

[13] Zhang H H, Yang G S, Shao H L, *et al*. Structure and properties of flax vs. lyocell fiber-reinforced polylactide stereocomplex composites[J]. Cellulose, 2021, 28: 9297-9308.

[14] 黄枫. 高耐热聚乳酸复合材料的制备及发泡性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
Huang F. Preparation and foaming properties of high heat-resistant polylactic acid composites[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2023.

Structure and Properties of Lyocell Fiber Reinforced Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Composites

Zhengze Li, Jun Lou, Gesheng Yang, Huihui Zhang
(*State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China*)

ABSTRACT: Poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) were used as matrices, Lyocell/PLA/PBAT composites were prepared through melt blending and injection molding by using a new type of regenerated cellulose fiber Lyocell fiber as reinforcing fiber. The influence of Lyocell fiber content on the structure and properties of the composites was investigated by mechanical property test, DSC, TGA, DMA, SEM, and Vicat softening temperature test. The results show that the crystallinity, mechanical properties, and Vicat softening temperature of PLA/PBAT composites are improved obviously by reinforcement of Lyocell fibers. The properties of Lyocell/PLA/PBAT composites increase firstly and then decrease with increasing content of Lyocell fiber. When the content of Lyocell fibers is 20%, Lyocell fibers are evenly dispersed in polymer matrices, and the composite exhibits the highest glass transition temperature and best comprehensive performance. Its tensile strength, elastic modulus, and Izod notched impact strength are increased by 41.6%, 81.3% and 90.6% respectively, compared to the PLA/PBAT composite. The Vicat softening temperature of 20% Lyocell/PLA/PBAT composite can reach 128.4 ℃, which is 66.8 ℃ higher than that of PLA/PBAT composite.

Keywords: biodegradable; poly(lactic acid); poly(butylene adipate-co-terephthalate); Lyocell fiber; composites