

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.005

高韧耐热 PLA/PBS 共混材料的制备及性能

杨皓然,张荣希,段同生,王天磊,刘双良,崔静,高丽君,周立明,方少明

(郑州轻工业大学材料与化学工程学院,河南省表界面科学重点实验室,郑州 450002)

摘要:首先以聚丁二酸丁二酯(PBS)为增韧剂、反应型扩链剂苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯(ADR)为增容剂对聚乳酸(PLA)进行增韧,制备 PLA/PBS/ADR 共混物。通过扫描电子显微镜(SEM)和万能试验机对材料的形貌和性能进行了表征和测试,结果显示,当 PLA 与 PBS 的质量比为 80:20 时,缺口冲击强度为 4.6 kJ/m²,比纯 PLA 增长了 64.3%。拉伸强度为 40.8 MPa。而当 PLA 和 PBS 的质量比为 80:20,ADR 的含量为 PLA 和 PBS 总质量的 1% 时,共混物的缺口冲击强度达到 32.8 kJ/m²,断裂伸长率为 255%,较 PLA 分别提高了近 11 倍和 45 倍。从 SEM 可以看出,加入 ADR 可以增强两相的相容性。随后,对 ADR 质量分数为 1% 的样品进行等温退火处理,相比于未热处理样品,其耐热性能显著提高。同时,其在基体 PLA 结晶完全时缺口冲击强度达到最高,为 56.1 kJ/m²。基体 PLA 结晶完全之后继续增加热处理时间,样品缺口冲击强度均降低。

关键词:聚乳酸;聚丁二酸丁二酯;增韧;反应增容;耐热

中图分类号:TQ323.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)06-0025-06

Preparation and Properties of PLA/PBS Blends with High Toughness and Heat Resistance

Yang Haoran, Zhang Rongxi, Duan Tongsheng, Wang Tianlei, Liu Shuangliang, Cui Jing, Gao Lijun, Zhou Liming, Fang Shaoming
(Henan Provincial Key Laboratory of Surface & Interface Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : By using polybutylene succinate (PBS) as toughening agent and reactive chain extender styrene-glycidyl methacrylate (ADR) as compatibilizer to toughen polylactic acid (PLA), PLA/PBS/ADR blends were prepared. The morphology and properties of the materials were characterized and tested by scanning electron microscopy (SEM) and universal testing machine. When the mass ratio of PLA to PBS is 80:20, the impact strength of PLA/PBS blends is 4.6 kJ/m², which is 64.3% higher than that of pure PLA. The tensile strength is 40.8 MPa. When the mass ratio of PLA to PBS is 80:20 and the content of ADR is 1%, the notched Izod impact strength and elongation at break of the blend reach 32.8 kJ/m² and 255%, which are nearly 11 times and 45 times respectively compared with PLA. Moreover, it can be seen from SEM that adding ADR can enhance the phase interface between the two phases. Subsequently, isothermal annealing treatment was carried out on the increased volume samples, significantly improving the heat resistance of the samples compared with the samples without heat treatment. At the same time, the notched izod impact strength reaches the highest value of 56.1 kJ/m² when PLA is crystallized completely. After increasing the heat treatment time, the notched izod impact strength of samples decrease.

Keywords : polylactic acid ; polybutylene succinate ; toughen ; reaction compatibilization ; heat resistance

聚乳酸(PLA)又称聚丙交酯,具有可生物降解、加工性能良好、具有优异的二次加工性能、生物相容性好等优势。然而它也有不足之处,如抗冲击性能差、耐热性差等^[1-2]。聚丁二酸丁二酯(PBS)是一种半结晶性聚合物,具有良好的加工性能、韧性和可

生物降解性,这些性能也使其增韧 PLA 的同时,保持其可再生性能的潜力^[3-6]。PLA 和 PBS 是热力学不相容体系,需要在 PLA/PBS 体系中加入增容剂,才能够有效提高两相相容性,从而使 PLA/PBS 共混材料的韧性得到提高。因此,多数 PBS 增韧 PLA

基金项目:国家自然科学基金项目(U1704256),中原科技创新领军人才项目(214200510017)

通信作者:周立明,博士,教授,主要研究方向为聚合物高性能化和功能化

收稿日期:2022-04-04

引用格式:杨皓然,张荣希,段同生,等.高韧耐热 PLA/PBS 共混材料的制备及性能[J].工程塑料应用,2022,50(6):25-30.

Yang Haoran, Zhang Rongxi, Duan Tongsheng, et al. Preparation and properties of PLA/PBS blends with high toughness and heat resistance[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):25-30.

的研究工作主要集中在如何提高 PLA 与 PBS 的相容性方面。研究结果显示,环氧呋喃树脂、二苯基甲烷二异氰酸酯、苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯(ADR)等增容剂能够有效提高 PLA 和 PBS 两相相容性^[7-11]。

在 PBS 增韧 PLA 的同时,同步提高共混材料的耐热性能够更加有效地扩大 PLA 的应用范围。通过冷结晶和熔体结晶的方式提高基体 PLA 结晶度能够有效提高制品的耐热性,同时,有研究表明,对于 PLA/PCL 共混体系,基体 PLA 的结晶能够使该共混材料的冲击韧性进一步提高^[12]。因此提高 PLA 共混材料中基体 PLA 的结晶度似乎是制备高韧、耐热 PLA 产品的有效方法。然而,目前针对高韧、耐热 PLA 制品的研究大多集中在非增容体系,反应增容体系中基体 PLA 结晶情况对共混材料韧性和耐热性的影响还未见报道。

笔者将不同配比的 PLA、PBS 和反应型增容剂 ADR 进行熔融共混,制备 PLA/PBS/ADR 材料,并研究 PBS 和 ADR 含量对 PLA/PBS/ADR 材料性能影响。随后,采用等温退火方法对 PLA/PBS/ADR 共混物样品进行等温热处理,制备高韧、耐热 PLA/PBS 共混材料,并研究基体 PLA 结晶情况及热处理时间对共混材料缺口冲击强度和耐热性影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA:L175,泰国道达尔科碧恩公司;

PBS:TH803S,工业级,新疆蓝山屯河化工股份有限公司;

扩链剂:ADR 4370s,德国 BASF 公司。

1.2 主要设备及仪器

X 射线衍射(XRD)仪:D8 Advance 型,德国 Bruker 公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q100 型,美国 TA 公司;

场发射扫描电镜(SEM):Hitachi SU8010 型,日本日立公司;

真空干燥箱:DZF-6050AB 型,北京中兴伟业仪器有限公司;

电子天平:LCD-A100 型,塞多利斯科学仪器有限公司;

转矩流变仪:HaakePolyLabOS 型,Thermo Scientific 公司;

平板硫化机:QLB-50T 型,江苏无锡市中凯橡

塑机械有限公司;

万能试验机:UTM2000 型,深圳三思纵横科技股份有限公司;

悬臂梁冲击试验机:S8225X 型,上海斯玄检测设备有限公司。

1.3 共混材料制备

为防止在共混时 PLA 含有水分,使用前将 PLA 和 PBS 放入真空干燥箱中,80℃下干燥 24 h。然后将 PLA/PBS 材料按照质量比 100/0,90/10,80/20,70/30,0/100 的比例进行称量。并分别加入到转矩流变仪中进行熔融共混,共混温度为 190℃,转速为 60 r/min,混料时间为 5 min。根据 PBS 含量将共混材料分别命名为 PLA, LB10, LB20, LB30 和 PBS。

样品制备:将密炼后的物料放入特定的模具中,然后使用平板硫化机进行热压成型。首先预热 5 min,随后以 10 MPa 热压 5 min,冷压 5 min。分别依照 GB/T 1004-20004 和 GB/T 1843-2008 制备拉伸样条和缺口冲击样条。

选用 PLA 和 PBS 质量比为 80/20 的样品进行反应增容实验,ADR 的质量分数分别为 PLA 与 PBS 总量的 0.25%,0.5%,0.75%,1%,1.25%,1.5%。共混材料及其力学性能测试样品的制备方法同上。

等温退火处理:将在平板硫化机制好的样条置于提前加热至 100℃的金属板中间,放进 100℃的烘箱中,使用秒表计时,到设定时间后取出,自然冷却至室温,备用。

1.4 性能测试

XRD 测试:在常温固定工作电压下进行测量,扫描范围为 5°~80°,步长为 0.05°,停留时间是 0.5 s。

SEM 测试:将需要测试的样品粘在贴有导电胶的铜台上,然后进行镀金处理,喷金 60 s,在 10 kV 电压下对样品进行形貌观察。

DSC 测试:取 3~5 mg 样品放入坩埚中,然后放入 DSC 仪中,在氮气氛围中进行测试。以 10℃/min 的速率将样品加热至 200℃并保持 3 min,然后以 10℃/min 的速率冷却至室温,最后以 10℃/min 的速率重新加热至 200℃。

拉伸性能测试:以 20 mm/min 的速率拉伸样条直至断裂,数据采集频率为 0.1 Hz,重复测试 5 次取平均值,按 GB/T 1040-2008 执行。

冲击性能测试:采用 5.5 N 冲击试验锤对制有

缺口的冲击样条进行性能测试,重复测试 5 次取平均值,按 GB/T 1843-2008 执行,缺口类型为 A 型。

热稳定性测试:将未热处理的样品和 100℃ 热处理的样品放在提前设置好温度 (100℃) 的烘箱中 1 h,并在样品上放置 100 g 的砝码。

2 结果与讨论

2.1 PLA/PBS 共混材料力学性能

图 1 为 PLA/PBS 不同比例下共混材料应力-应变曲线,表 1 是不同 PBS 含量时共混材料的综合力学性能。从表 1 可以看出,纯 PLA 的断裂伸长率极低,只有 5% 左右,而当加入 10% 的 PBS 时,断裂伸长率达到了 175%,但是随着 PBS 含量的增加,断裂伸长率先增大后减小,可能是因为 PLA 与 PBS 相容性差所导致的^[13]。此外,PLA/PBS 材料拉伸强度及其弹性模量均随着 PBS 含量的增加呈现出逐渐降低的趋势。这是因为 PBS 本身的强度和刚度较低,高含量 PBS 会劣化 PLA 的综合性能。

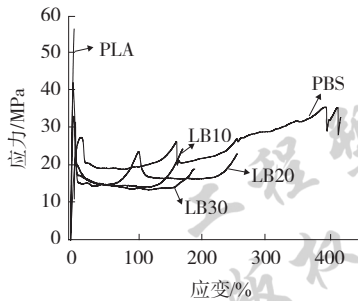


图 1 不同 PBS 含量时 PLA 共混材料的应力-应变曲线

表 1 不同含量 PBS 时 PLA 共混材料的力学性能

样品名称	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	拉伸弹性模量 / MPa	缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)
PLA	58.5	5.5	1308.5	2.8
LB10	40.3	175	1195.5	3.0
LB20	40.8	265	1154.6	4.6
LB30	34.6	195	972.2	4.5
PBS	35.3	420	305.1	11.6

由表 1 可知,PBS 的加入能够使 PLA 共混材料缺口冲击强度得到提高,随 PBS 含量的逐渐增加,共混材料的缺口冲击强度逐渐由纯 PLA 的 2.8 kJ/m² 提高到了 4.6 kJ/m²,当 PBS 质量分数达到 20% 时,缺口冲击强度增加了 64.3%。这是因为 PBS 材料本身韧性较好,冲击强度为 11.6 kJ/m²,可以有效增韧 PLA,提高其缺口冲击强度。然而,此含量时虽然其缺口冲击强度和断裂伸长率均较纯 PLA 有所提高,且为各共混比例中最优,但其缺口冲击强度提高幅度较小。因此采用 ADR 对 LB20 样品进行增容,以期进一步提高共混材料的冲击韧性,并研究

增容剂 ADR 含量对样品冲击性能影响。

2.2 ADR 增容共混材料的结构与性能

ADR 主要是通过其分子中的多个环氧官能团与 PLA 和 PBS 分子的端羧基等发生开环反应。从而将两组分衔接起来,增大了两相的界面结合,提高两者相容性^[14]。

表 2 是不同 ADR 质量含量时 PLA/PBS 共混材料力学性能,由表 2 可以看出 ADR 的加入使样品拉伸强度有所提高,但拉伸弹性模量几乎不变。同时,随 ADR 含量增加,样品拉伸强度及其弹性模量变化不大。需要注意的是,当 ADR 含量低于 1% 时,样品断裂伸长率较不添加 ADR 时明显下降。可能原因是 ADR 含量较低时,分散性较好,会被包裹在 PLA 或 PBS 相中而非处于两相界面处,此时 ADR 充当了扩链剂作用,起不到增容效果,新形成的较长 PLA 或 PBS 分子链反而会使两相相容性劣化,断裂伸长率降低。当 ADR 含量增加时,较多的 ADR 使得其分散性变差,从而被 PLA 和 PBS 排出至两相界面处,起到增容效果,断裂伸长率逐渐增加。

表 2 ADR 增容 LB20 共混材料的力学性能

ADR 质量含量 / %	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	拉伸弹性模量 / MPa	缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)
0	40.8	265	1154.6	4.6
0.25	46.2	24.6	1143.1	5.0
0.5	46.8	30	1153.2	26.6
0.75	45.6	105	1184.2	31.2
1	45.9	255	1155.6	32.8
1.25	48.1	255	1014.6	21.8
1.5	46.2	235	1117.4	12.8

虽然 ADR 含量低时,断裂伸长率下降明显,但样品的缺口冲击强度却有所提高。这表明经扩链后的 PBS 能够起到提高复合材料缺口冲击强度的作用,这也与陈烜等^[15]对于 PLA/PBAT/ADR 体系的研究结果一致。当 ADR 质量含量为 1% 时(样品标记为 1% ADR),样品缺口冲击强度达到最大值 32.8 kJ/m²,较纯 PLA 提高了近 11 倍,同时断裂伸长率较纯 PLA 提高了 45 倍。通过对比 LB20 和 1% ADR 两种共混材料断面的 SEM 图(图 2)可以发现,加入 ADR 后体系中分散相颗粒尺寸减小且大小更加均一,相界面较 LB20 体系变得模糊,说明 ADR 的加入有效改善了两相相容性,这也是其缺口冲击强度大幅提高的原因。图 3 为 LB20,1%ADR 冲击断面 SEM 图,从图 3 可看出 1%ADR 共混材料的断面明显变得粗糙,其断裂面从脆性断裂转为韧性断裂,冲击断面上出现明显塑性变形。当 ADR

含量超过 1% 后,增加 ADR 含量,样品缺口冲击强度又会降低。这是因为当 ADR 含量较高时,较多 ADR 分散不均匀,影响其增容效果,从而导致 PLA/PBS/ADR 材料缺口冲击强度降低^[16]。

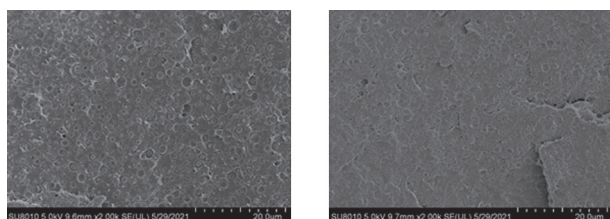


图 2 PLA 共混材料断面 FESEM 图

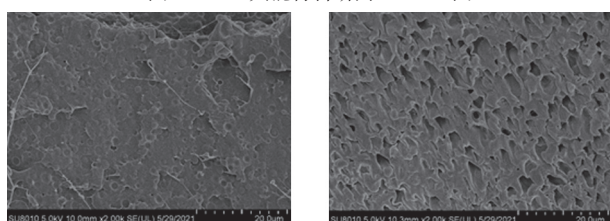


图 3 PLA 共混材料冲击断面 FESEM 图

2.3 等温退火处理对共混材料结构与性能的影响

为提高共混材料的耐热性,并研究增容体系中基体 PLA 结晶情况对共混材料冲击韧性的影响,选用 1% ADR 样品进行等温退火处理,并对其结构和性能进行了表征。LB20 作为对比也进行同样的处理和表征,XRD 曲线及 DSC 曲线分别见图 4 和图 5。

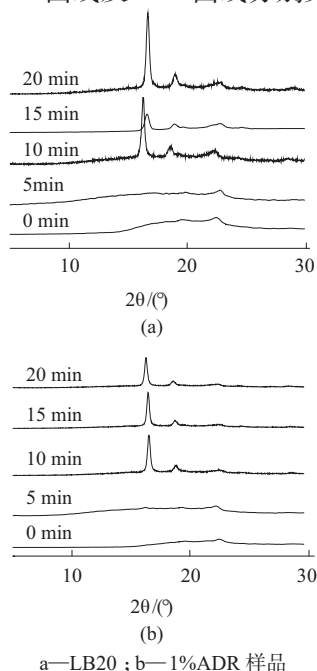


图 4 PLA 共混材料 100 °C 热处理不同时间的 XRD 曲线

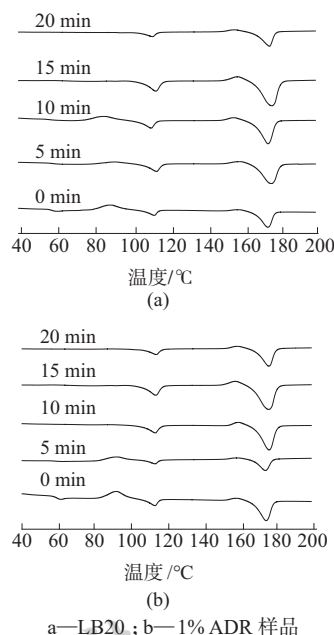


图 5 PLA 共混材料 100 °C 热处理不同时间的 DSC 升温曲线

图 4 的 XRD 图显示,所有在热处理至 PLA 完全结晶的材料在 16.4° 和 18.7° 都出现特征衍射峰,这些峰分别为 PLA 的 HC 晶体 (PLA 同质结晶形成的晶体) 的 (200)/(100) 和 (203) 晶面,表明有 HC 晶体生成。从图 5 的 DSC 曲线可以看出,在 100 °C 进行热处理的情况下, LB20 在 15 min 时 PLA 冷结晶峰完全消失,说明其完全结晶,而 1% ADR 在 10 min 时就已完全结晶。

表 3 和表 4 分别为 LB20 和 1%ADR 复合材料 100 °C 不同热处理时间的 DSC 数据。从表 3 可以看出,随着热处理时间的增加, LB20 中基体 PLA 结晶度逐渐变大,当热处理时间为 15 min, PLA 完全结晶,再增加热处理时间结晶度基本保持不变。1% ADR 样品所呈现的规律与 LB20 一致,两种样品完

表 3 LB20 复合材料 100 °C 不同热处理时间的 DSC 数据

处理时间 / min	冷结晶峰温度 / °C	冷结晶峰热焓 / (J · g ⁻¹)	PLA 熔融温度 / °C	PLA 熔融热焓 / (J · g ⁻¹)	结晶度 (X _c) / %
0	89.60	9.98	174.50	25.15	20.4
5	91.59	6.206	176.14	36.22	40.32
10	89.08	2.71	174.13	37.04	46.1
15	—	—	174.12	42.02	56.5
20	—	—	174.91	40.20	54.03

表 4 1%ADR 复合材料 100 °C 不同热处理时间的 DSC 数据

处理时间 / min	冷结晶峰温度 / °C	冷结晶峰热焓 / (J · g ⁻¹)	PLA 熔融温度 / °C	PLA 熔融热焓 / (J · g ⁻¹)	X _c / %
0	92.24	23.51	175.09	47.78	32.6
5	90.90	9.03	175.85	30.88	29.7
10	—	—	176.26	39.521	53.1
15	—	—	176.50	40.24	54.2
20	—	—	175.09	43.36	58.3

全结晶之后基体 PLA 的结晶度也基本相同,均为 54% 左右。不同的是,1%ADR 样品基体 PLA 完全结晶的时间为 10 min,短于 LB20。说明与 PLA 经 ADR 相连接的 PBS 链在等温退火时能够起到提高 PLA 分子链运动能力的作用,使结晶加快。

图 6 是 LB20 和 1%ADR 共混材料热处理前后的热变形图片,由图 6 可以看出,未热处理的 LB20 和 1%ADR 样条可以看到较大的变形,但 1%ADR 的变形幅度小于 LB20,说明增容剂的加入有助于提高共混材料的耐热性。对于 100℃热处理至基体 PLA 完全结晶的 LB20 和 1%ADR 样条,则没有变形的痕迹,说明基体 PLA 的结晶能够有效提升样品的耐热性。

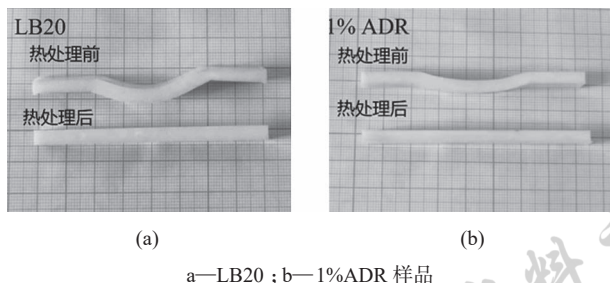


图 6 PLA 共混材料热处理前后的热变形图片

图 7 是 LB20 和 1% ADR 两种样品缺口冲击强度和基体 PLA 结晶度随热处理时间的变化曲线。从图 7 可发现,样品缺口冲击强度都随着热处理时间延长呈现出先增加后降低的趋势。其中热处理后

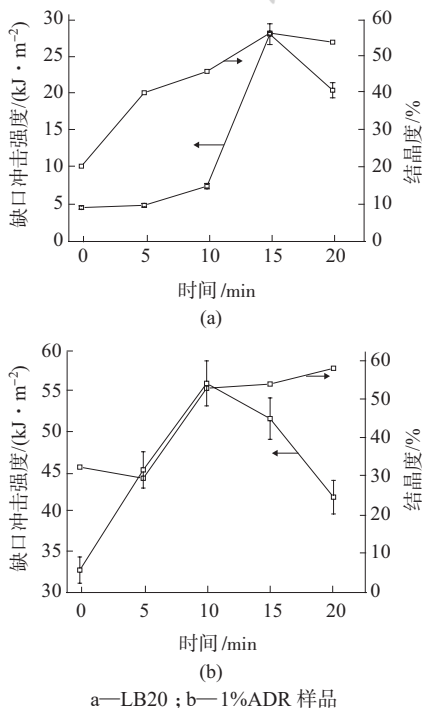


图 7 PLA 共混材料缺口冲击强度及结晶度随热处理时间变化曲线

LB20 样品冲击强度最高为 28.1 kJ/m²,热处理后 1 % ADR 共混材料冲击强度最高达到 56.1 kJ/m²。且缺口冲击强度最高点对应样品中 PLA 冷结晶完成的时刻。PLA 基体结晶完全之后,继续增加热处理时间可能会使分散相由于热运动而发生合并,尺寸增大,较大的分散相尺寸不利于提高聚合物的缺口冲击强度。这可能是导致两个样品完全结晶之后继续增加热处理时间其缺口冲击强度降低的原因^[17]。

图 8 是 LB20 和 1% ADR 样品热处理至 PLA 结晶完全时刻的断面 SEM 图片,从图 8 看出分散相形态较热处理前(图 2)无明显变化。因此,样品热处理后缺口冲击强度增加的原因是基体 PLA 结晶程度提高,PLA 晶体构成的三维网络能够在样品受到冲击的时候与分散相一起起到分担应力的作用。同时,材料在高温下具有较高能量,其内部分子运动能力强,长时间的热处理促进了内部分子的重排,结晶的同时排除了一些缺陷,从而使缺口冲击强度得以提升^[18]。加入 ADR 的样品缺口冲击强度高的原因应该是 ADR 具有较好的增容效果^[16]。以上结果表明,结合反应增容和等温退火的手段,可以制备高韧、耐热 PLA/PBS 共混材料,这对于扩大 PLA 材料的应用领域具有一定的意义。

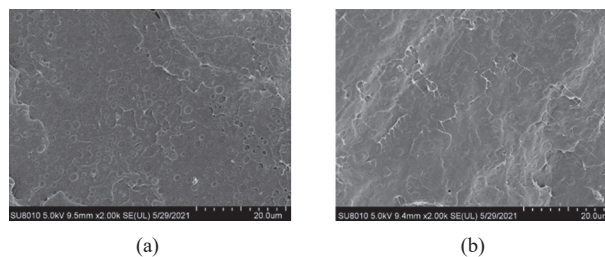


图 8 100℃下热处理完全结晶后 PLA 共混材料断面 FESEM 图

3 结论

采用反应增容和等温退火相结合的方式制备了高韧、耐热全降解 PLA/PBS 共混材料,并对 PBS、ADR 含量以及热退火时间对 PLA/PBS 共混物结构与性能的影响进行了研究,主要结论如下:

(1) 当 PLA 与 PBS 质量比为 80 : 20 时,缺口冲击强度为 4.6 kJ/m²,比纯 PLA 增长了 64.3%。拉伸强度为 40.8 MPa。与其他比例相比综合性能较为优异。

(2) 当 PLA/PBS 质量比为 80 : 20 时,加入增容剂 ADR 的质量含量为 1% 时,共混物的缺口冲击强度达到 32.8 kJ/m²,断裂伸长率达到了 255%,缺口冲击强度和断裂伸长率分别较 PLA 提高了近 11

倍和45倍。

(3) 当进行耐热处理时,未热处理LB20和1%ADR样条发生了巨大的变形,但对于100℃热处理至PLA完全结晶的LB20和1%ADR样条,则没有变形的痕迹。

(4) LB20和1%ADR两组样品都在基体PLA结晶完全的缺口冲击强度达到最高,其中加入1%ADR的共混材料在100℃下热处理10 min后缺口冲击强度达到了56.1 kJ/m²。之后继续增加热处理时间,两组样品缺口冲击强度均降低。

参考文献

- [1] Allity R, Lamnawar K, Maazouz A. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(10):1 898–914.
- [2] 范龙, 胡珊, 张俊. 聚乳酸/热塑性淀粉共混材料的性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(6):35–39.
Fan Long, Hu Shan, Zhang Jun. Study on properties of poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(6):35–39.
- [3] Zhou Jintang, Yao Zhengjun, Zhou Chang, et al. Mechanical properties of PLA/PBS foamed composites reinforced by organophilic montmorillonite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(18). DOI.org/10.1002/app.40773.
- [4] Wang Jin, Zheng Liuchun, Li Chuncheng. Fully biodegradable blends of poly(butylene succinate) and poly(butylene carbonate): Miscibility, thermal properties, crystallization behavior and mechanical properties[J]. *Polymer Testing*, 2012, 31(1):39–45.
- [5] 闫冬雪, 戴冕之, 王柯, 等. 可降解型聚丁二酸丁二醇酯/聚乳酸原位成纤增强共混材料[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(2):95–99.
Yan Dongxue, Ji Mizhi, Wang Ke, et al. In-situ microfibrillation and mechanical reinforcement of degradable poly(butylene succinate)/poly(lactic acid) blend[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2014, 30(2):95–99.
- [6] 谌鹏宇, 唐国翌, 宋国林. PLA/PBS/BP 复合材料的结构与性能研究[J]. *塑料科技*, 2014, 42(7):89–94.
Chen Pengyu, Tang Guoyi, Song Guolin. Study on structure and properties of PLA/PBS/BP composite[J]. *Plastics Science and Technology*, 2014, 42(7):89–94.
- [7] Chen Rongyuan, Zou Wei, Wu Chengran, et al. Poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/calcium sulfate whiskers biodegradable blends prepared by vane extruder: Analysis of mechanical properties, morphology, and crystallization behavior[J]. *Polymer Testing*, 2014, 34:1–9.
- [8] 朱大勇, 辜婷, 于杰, 等. 环氧呋喃树脂反应性增容 PLLA/PBS 共混体的动态流变征[J]. *材料研究学报*, 2018, 32(7):69–76.
Zhu Dayong, Gu Ting, Yu Jie, et al. Dynamic rheological characterization of PLA/PBS blends compatibilized by epoxy furan resin[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2018, 32(7):69–76.
- [9] Chuai Chengzhi, Zhao Nan, Li Shu, et al. Study on PLA/PBS blends[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1167(197–198):1 149–1 152.
- [10] 姜锐. PLA/PBS/nano-ZnO 共混材料的制备及其性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Jiang Rui. Preparation and properties of PLA/PBS/nano-ZnO blends[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [11] 陈文婷, 李子芬, 彭少贤. 反应共混增韧全生物降解 PLA/PBS 共混材料[J]. *塑料*, 2019, 48(3):94–99.
Chen Wenting, Li Zifen, Peng Shaoxian. Preparation of high-toughness and biodegradable PLA/PBS blends by reaction blending[J]. *Plastics*, 2019, 48(3):94–99.
- [12] Bai Hongwei, Xiu Hao, Gao Jian, et al. Tailoring impact toughness of poly(L-lactide)/poly(ϵ -caprolactone) (PLLA/PCL) blends by controlling crystallization of PLLA matrix[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(2):897–905.
- [13] 侯树家. 聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯共混体系的改性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
Hou Shujia. The modification research of PLA/PBS blends[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [14] 刘映婷, 唐宇航, 夏浙安, 等. ADR 对 PLA/PE-g-MA 共混体系结构与性能影响[J]. *塑料科技*, 2016, 44(4):66–70.
Liu Yingting, Tang Yuhang, Xia Zhe'an, et al. Effect of ADR on structures and properties of PLA/PE-g-MA blends[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(4):66–70.
- [15] 陈烜. 高韧性、高耐热形变温度 PLA/PBAT 共混物的制备及性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
Chen Xuan. Preparation and properties of PLA/PBAT blends with high toughness and high heat resistance[D]. Haikou: Hainan University, 2017.
- [16] 刘洒文, 高山俊, 沈春晖, 等. 聚乳酸/聚丁二酸丁二醇扩链改性材料研究[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(3):7–13.
Liu Sawen, Gao Shanjun, Shen Chunhui, et al. Study on polylactic acid/polybutylene succinate extended chain modification materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(3):7–13.
- [17] 周洪. 改善聚乳酸材料耐热性能方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
Zhou Hong. Research on the improvement of heat resistance of poly lactic acid materials[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [18] Deng Liang, Xu Cui, Wang Xuehui, et al. Supertoughened polylactide binary blend with high heat deflection temperature achieved by thermal annealing above the glass transition temperature[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 6(1):480–490.