

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.014

加料顺序对 PLA/PBS/PEG 共混物的力学性能及耐热性影响

付蕾, 张利超, 尹红艳, 贾仕奎

(陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西汉中 723000)

摘要: 通过熔融开炼共混法制备了聚乳酸 (PLA)/ 聚丁二酸丁二酯 (PBS)/ 聚乙二醇 (PEG) 共混物, 考察了不同加料顺序对共混物的影响。利用电子拉力试验机测试共混物的力学性能, 同步热分析仪分析其热稳定性。实验证明, PLA 和 PBS 熔融混合均匀后, 再加入 PEG 的加料顺序, 可以提高 PLA/PBS/PEG 共混物的韧性; PEG 加入可以提高共混物的热稳定性。通过扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、偏光显微镜进一步证明, PLA 和 PBS 熔融混合均匀后, 再加入 PEG 的加料顺序, 可以更有效地均化分散相尺寸, 细化结晶粒度, 降低体系的界面张力, 提高两相的相容性。

关键词: 加料顺序; 聚乳酸 / 聚丁二酸丁二酯 / 聚乙二醇; 力学; 热稳定性

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0080-06

Effect of Feeding Sequence on Mechanical Properties and Heat Resistance of PLA/PBS/PEG Blends

Fu Lei, Zhang Lichao, Yin Hongyan, Jia Shikui

(School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract : Polylactic acid / polybutylene succinate / polyethylene glycol (PLA/PBS/PEG) blends were prepared by melt scouring blending method. The effects of different feeding sequences on the blends were investigated. The mechanical properties of the blends were tested by electronic tensile testing machine, and the thermal stability was analyzed by synchronous thermal analysis. The results show that the toughness of PLA/PBS/PEG blends can be improved by melt mixing of PLA and PBS and adding PEG. The addition of PEG can improve the thermal stability of the blends. It is further proved by scanning electron microscope, X-ray diffractometer and polarizing microscope that after the melt mixing of PLA and PBS is uniform, the feeding sequence of PEG can more effectively homogenize the dispersed phase size, refine the crystalline particle size, reduce the interfacial tension of the system and improve the compatibility of the two phases.

Keywords : feeding sequence ; polylactic acid / polybutylene succinate / polyethylene glycol ; dynamics ; thermal stability

2019年6月5日, 国务院召开常务会议, 通过《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(修订草案)》, 《草案》明确提出防止过度包装造成环境污染, 并通过禁止生产、销售不易降解的覆盖物和包装物等条款。根据国家发改委2019年11月6日发布的《产业结构调整指导目录(2019年本)》, “纺织”板块明确指出了“聚乳酸”(PLA)相关材料的发展方向。政策的导向表明, 可降解的高分子材料是未来的发展趋势。随着新冠病毒的爆发, 对于口罩及防护用聚丙烯(PP)喷熔布材料的需求激增, 废弃物处理成了影响环境的主要问题, 可降解塑料制品成

为研究的热点。

PLA 又称聚丙交酯, 属于聚酯家族, 它是以乳酸为主要原料聚合得到的一种可生物降解聚合物, 使用后能被自然界中微生物在特定条件下完全降解为二氧化碳和水。PLA 具有良好的拉伸强度、模量和透明度, 但 PLA 分子间具有范德华力、色散力、氢键等较强的分子间作用力, PLA 的 α 晶, 晶型粗大, 都会导致 PLA 韧性不好、耐热性能差。将 PLA 与其它聚合物共混, 改善 PLA 的韧性是简洁、实用的办法^[1-5]。聚丁二酸丁二酯 (PBS), 由丁二酸和丁二醇经缩聚而得, 树脂呈乳白色, 无嗅无味, 易被自然

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JM-486)

通信作者: 付蕾, 高级实验师, 主要研究方向为高分子功能材料的性能表征

收稿日期: 2022-02-09

引用格式: 付蕾, 张利超, 尹红艳, 等. 加料顺序对 PLA/PBS/PEG 共混物的力学性能及耐热性影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):80-85.

Fu Lei, Zhang Lichao, Yin Hongyan, et al. Effect of feeding sequence on mechanical properties and heat resistance of PLA/PBS/PEG blends[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):80-85.

界的多种微生物或动植物体内的酶分解、代谢,最终分解为二氧化碳和水,是典型的可完全生物降解的聚合物材料;但 PBS 的拉伸强度和拉伸弹性模量较低,和 PLA 相比, PBS 的韧性和耐温性优于 PLA,但强度和透明度不如 PLA。PBS 与 PLA 共混,可以改善 PLA 的韧性,提高 PBS 的强度^[4-5]。聚乙二醇(PEG)由环氧乙烷与水或乙二醇逐步加成聚合而成,溶于水、乙醇和许多其它有机溶剂,有良好的吸湿性、润滑性、粘结性,在自然条件下可以完全降解。PEG 含有较多的端羟基,可进行酯化反应,与 PLA 相容性好,经常用来增韧 PLA^[2]。由于 PLA 为刚性材料,与柔性高分子 PBS 之间的相容性很差,不添加改性剂,就会出现不相容的情况,微观表现为海岛结构,影响使用。李翔宇等^[6]通过熔融共混法制备了 PEG/PLA/PBS 复合材料,研究表明 PEG 对 PLA 和 PBS 同时具有增塑作用,促进了 PLA 与 PBS 之间的相容性,提高了共混物的可使用性能。

选用 PLA : PBS : PEG 质量比为 80 : 20 : 20,采用不同的加料方式共混,利用 PBS 的韧性和 PEG 的增韧作用增韧 PLA,并提高 PLA 和 PBS 的界面相容性。目前,多种材料共混时,加料顺序的不同对复合材料性能影响的研究鲜有报道。因此,笔者用不同的加料顺序,制备 PLA/PBS/PEG 共混物,研究了加料顺序对 PLA/PBS/PEG 共混物的韧性及热稳定性的影响,并通过微观形貌观察、结晶性能分析研究韧性和耐热性改变的机理。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA : 4032D,美国 NATURE WORKS 公司;
PBS : NA628BP52,日本昭和电工株式会社;
PEG : 分子量 10 000,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

塑料开炼机: KY-3203B-160 型,开研精密机械设计厂;
电热鼓风干燥箱: DHC-9053A 型,上海和呈仪器制造有限公司;
平板硫化机: QLB-25T 型,昆山科瑞特试验仪器有限公司;
电子拉力试验机: LDS-20KN 型,长春市智能仪器设备有限公司;
同步热分析仪: TGA/DSC1 型,瑞士 METTLER TOLEDO 仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet 6700 型,美国 Nicolet 公司;

扫描电子显微镜 (SEM) : JSM-6390LV 型,日本 JEOL 公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: Ultima IV 型,日本理学株式会社;

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC1/500 型,瑞士 METTLER TOLEDO 仪器有限公司;

偏光显微镜 (POM) : Scope-A1 型,德国 Carl Zeiss 公司。

1.3 PLA/PBS/PEG 共混物制备

将干燥好的 PLA, PBS, PEG,用不同的加料顺序在塑料开炼机上熔融混炼,加料顺序见表 1。塑料开炼机的前后辊轮温度根据加料不同适当调整,辊轮转速为 10 r/s。

表 1 制备 PLA/PBS/PEG 共混物的加料顺序

试样编号	加料顺序
A	PLA 和 PBS 一次投料 (无 PEG)
B	PLA, PBS 和 PEG 一次投料
C	PLA 和 PBS 熔融混合均匀后,加入 PEG 再混合均匀
D	PBS 和 PEG 熔融混合均匀后,加入 PLA 再混合均匀
E	PLA 和 PEG 熔融混合均匀后,加入 PBS 再混合均匀

1.4 性能测试与表征

(1) 拉伸性能分析。

将熔融混合均匀的 PLA/PBS/PEG 共混物,放置于平板硫化机上的拉伸样条模具中,150℃、5 MPa 的压力下成型。

拉伸性能按照 GB/T 1040.1-2006 测试,拉伸速率为 100 mm/min,选取合格的每种样品各 5 个,测试后取其平均值。

(2) 热稳定性分析。

在 N₂ 氛围下,取 10 mg 左右的样品置于同步热分析仪中,以 10℃ /min 的速率从 30℃ 升温至 600℃,记录样品质量随温度的变化。

(3) SEM 测试界面相容性。

将 5 种共混物在液氮中淬断,断面喷金处理后,置于 SEM 下,观察断面微观形貌,放大 1 000 倍。

(4) 结晶性能分析。

XRD 测试: 测试结晶聚合物的晶面衍射强度,通过衍射峰的大小可以判断该聚合物的结晶度。截取边长为 5 mm 的样品,样品表面平整,无划痕,采用 Cu 靶 K_α 射线,波长为 0.154 nm,电流 40 mA,电压 40 kV,扫描步进 5°/min,扫描范围 5°~70°。

POM 测试: 分别将 5 种共混物,在 195℃ 下置

于载玻片与盖玻片之间压制成厚度约为 20 μm 的薄膜,通过 POM 观察共混物的球晶形态。

2 结果与讨论

2.1 PLA/PBS/PEG 共混物的拉伸性能

图 1 为不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物拉伸应力-应变曲线。由图 1 可知,在拉伸的过程中, B, C, D, E 4 种试样都出现了缩颈现象,未加 PEG 的 A 组材料,拉伸强度和断裂伸长率都很低。PEG 可以有效改善 PLA 和 PBS 的界面相容性,提高 PLA/PBS/PEG 共混物的韧性, B, C, D, E 4 组材料均出现普弹形态、屈服点和强迫高弹形态。C 组材料无论是拉伸强度还是断裂伸长率都优于 A, B, D, E 4 种材料, C 组材料在屈服点后应变随着应力变化,在小外力的情况下出现了大形变,应变是 4 种材料中最高的, PLA 和 PBS 熔融混合均匀后,再加入 PEG 的加料方法可以提高 PLA/PBS/PEG 共混物的韧性。PEG 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右易被氧化,首先混合 PBS 和 PLA, PEG 加入时间短,可以有效避免 PEG 的氧化,保证 PEG 可以更好地增强 PLA/PBS 界面相容性。

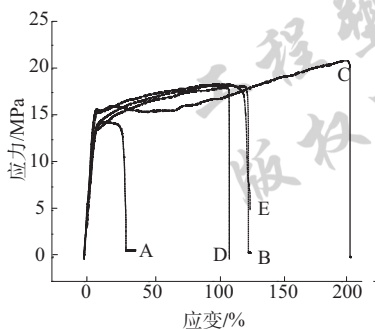


图 1 不同加料顺序制得 PLA/PBS/PEG 共混物拉伸应力-应变曲线

表 2 为不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的拉伸强度和断裂伸长率。由表 2 可知,当添加了 PEG 后共混物的拉伸强度明显增大,表明 PEG 的加入使得 PLA, PBS 分子链的运动能力增强,分子链间缠结增大,分子链变刚变硬;此外, PEG 和 PBS 还可以改善 PLA 分子链的柔顺性,使得 PLA 分子链不再是刚性结构,而表现出一定的韧性,故两方面的协调作用提高了 PLA/PBS/PEG 共混物的拉伸性能。此外,通过观察拉伸过程发现 PLA/PBS/PEG 共混物断裂过程有明显的“颈缩”现象,断裂缺口处不平整,断裂过程中所需能量大,这是因为 PEG 的加入使得 PBS 的分散相尺寸降低,有部分的外力通过 PBS 的分散相变形而耗损,说明 PLA/PBS/PEG 共混物是塑性材料,可见通过塑料开炼机熔融共混

就可以使得 PLA 的脆性断裂缺陷得到很大改善。对比可见加料顺序为先混合 PLA 和 PBS 再添加 PEG 时,拉伸强度提高得最明显,进一步说明 PEG 不能添加过早。

表 2 不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的拉伸强度和

项目	断裂伸长率				
	试样编号				
	A	B	C	D	E
拉伸强度 /MPa	14.2	17.5	21.2	17.3	18.0
断裂伸长率 /%	22	131	207	109	129

2.2 PLA/PBS/PEG 共混物的热稳定性

图 2 为不同加料顺序的 5 种共混物的热重 (TG) 曲线。从图 2 可以看出,共混物的热分解阶段发生在 240~400 $^{\circ}\text{C}$,由图 2 可知, A 材料的起始分解温度虽然高,但其与其它材料相比在一定升温速率下,单位时间聚合物失重率急速上升,分解速度快,所以 A 材料的热稳定性与其它 4 种材料的热稳定性略有下降。而之所以其它 4 种材料的起始分解温度比较低,这主要是因为加入了分子量较低的 PEG,其分子量小,并带有的极性基团多,所以导致起始分解温度变低。A 材料比其它材料的单位时间分解的速率快,表明 PLA 与 PBS 的界面相容性较差,使得界面结合力不佳,其材料的分子间交联力小,因此分解速率快;当加入 PEG 后,一方面可以改善 PLA 和 PBS 两材料的相容性,增加了两材料的界面结合力^[1],使复合材料的热稳定性得到了改善;另一方面 PEG 使得 PLA 和 PBS 两分子间发生交联,增大了分子间作用力,阻碍了 PLA 分子的链段运动,热稳定性提高。综合比较,先共混 PLA 和 PBS,最后再加入 PEG 的方法,不但提高了初始分解温度,而且分解速率降低,热稳定性是添加 PEG 的共混物中最优的。

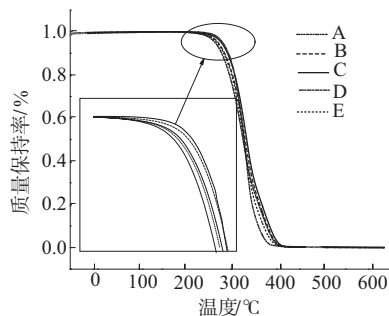
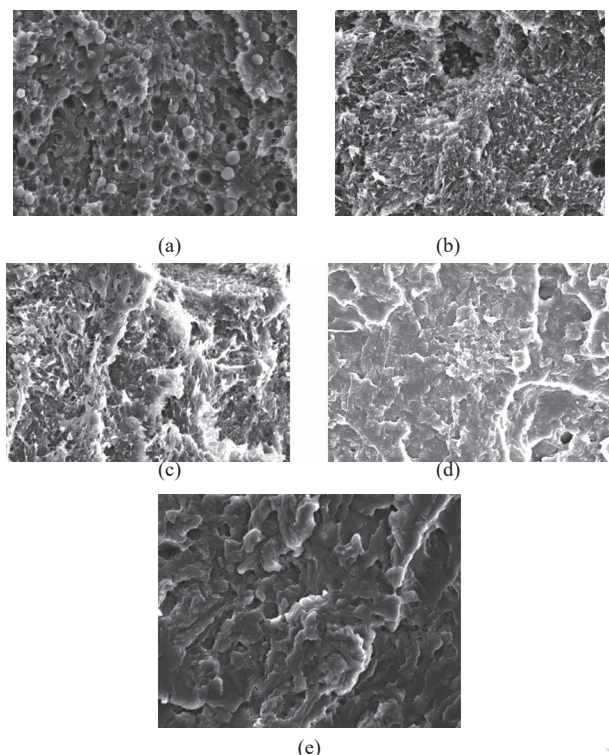


图 2 不同加料顺序制得的 PLA/PBS/PEG 共混物的 TG 曲线

2.3 PLA/PBS/PEG 共混物的界面相容性

图 3 为不同加料顺序制得的 PLA/PBS/PEG 共混物的断面 SEM 照片。由图 3a 可以看出, PLA 与 PBS 两相之间界面形貌明显, PBS 以球形颗粒形态



试样: a—A; b—B; c—C; d—D; e—E

图3 不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的断面 SEM 照片

分布于 PLA 的网状结构中,表现出明显的“海-岛”结构,从断面可以明显看出,PLA 与 PBS 进行共混时其效果不佳,相容性差。D 试样比 A 试样断面的球形颗粒明显减少,但还是有较多的球形物质,而且断面呈锯齿形,各组分界面明显。B 试样的断面各组分界面比较模糊,但是相比 D 试样,会发现少量不规则的孔,三种组分之间依旧没有完美结合。E 试样与 B 试样情况相似,还是有部分球形物质没有分散开。由图 3c 可以发现,加入 PEG 之后,组织断面不再有球形颗粒物质,断面纹路模糊,各组分均匀的共混为一体,相貌融合明显。综合对比可以发现,PEG 的加入使 PLA/PBS 共混物的界面形貌有很大变化, PBS 分散相球形颗粒明显减少,颗粒尺寸也明显降低,各组分尺寸分布更加均匀,基体组织结构开始出现“海-海”结构,这主要是有两个方面的原因,一方面是由于 PEG 的加入充当 PLA/PBS 的增塑剂^[12-13],降低了 PLA 分子链内旋转所需的位垒,促进了 PLA 的分子链段运动,在一定程度上明显改善改善了界面结合力;另一方面 PEG 的加入降低了 PLA, PBS 两相的界面张力,增强了两组分的相容性。比较 5 张照片,先共混 PLA 和 PBS,最后再加入 PEG 的方法,也就是图 3c,三种材料完全看不出界面,相容性是添加 PEG 的共混物中最优的。

2.4 PLA/PBS/PEG 共混物的结晶性能

(1) XRD 测试。

图 4 为 PLA/PBS/PEG 共混物的 XRD 图谱。可以看出, A 材料虽然在 19° 处有明显的衍射峰,但是相比加了 PEG 的各组分,峰的强度相对较弱。相比 A 材料, PLA/PBS/PEG 共混物的结晶能力都明显提高,说明 PEG 的加入对 PLA 和 PBS 分子链都起到了增塑作用。通过对比可以发现,当加料顺序为先共混 PLA 和 PBS,再混合 PEG 时, PEG 的特征衍射 ($2\theta=19^\circ, 22^\circ$) 峰强度明显提高。而衍射峰强度的大小可以反映出晶体表面的情况,衍射峰越大,晶体表面越完善,其衍射峰强度越高。说明先共混 PLA 和 PBS 两组分, PBS 与 PLA 的分子链先充分缠结,相互环绕,再添加 PEG 能更好地发挥 PEG 的增塑作用,润滑 PLA 分子链,增强其运动强度,两分子链缠结得越来越紧密,分子之间的结合力增强,从而提高 PLA/PBS/PEG 共混物的结晶能力。

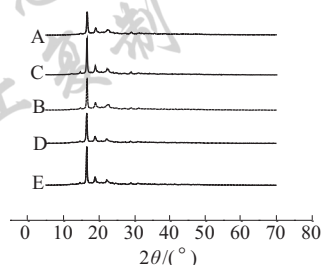
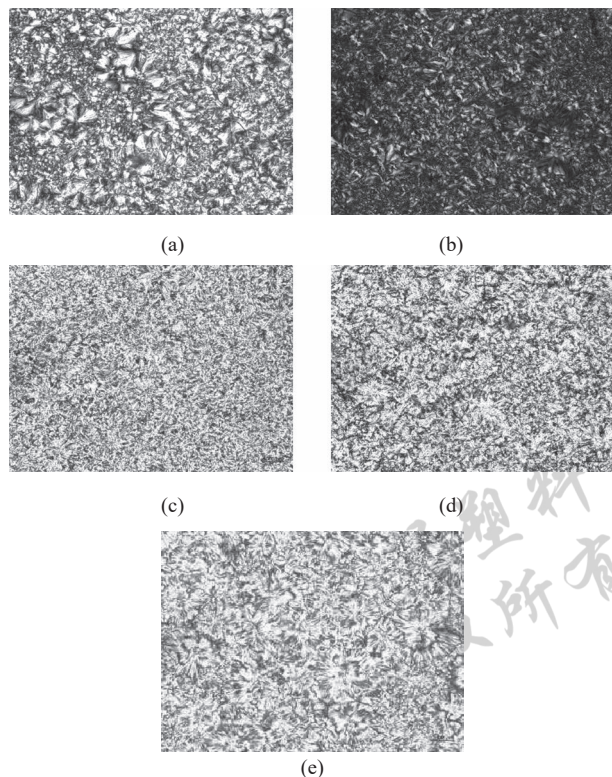


图4 不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的 XRD 图

(2) 球晶结构比较。

图 5 为不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的 POM 照片。由图 5 可以清晰地看出,未加 PEG 的 A 材料主要为少部分的结构完整的球晶且球晶尺寸大,还有很多区域没有结晶,这都表明 A 材料的结晶速率很低,其原因主要是 PLA 的手性碳结构,阻碍了分子内发生单键的内旋转,使得 PLA 链段运动困难,不易发生结晶。B, C, D, E 4 种材料由于加入了 PEG,使得材料的结晶度增加,晶体的尺寸明显减小,晶粒发生细化,结晶的球晶数目也有一定的增加,单位面积成核密度大。产生这些现象的原因主要有两个方面,第一个方面是加入小分子量的 PEG 在共混材料中充当了异相成核剂^[14-15],为晶体提供了更多的晶核,在一定程度上诱导了 PLA 和 PBS 的结晶过程;第二个方面主要是 PEG 也可以作为 PLA 材料的增塑剂,降低了 PLA 材料分子链内旋转所需的位垒,促进了 PLA 的分子链段运动,在一定程度上提高了分子链规整的可能性,从而促进了 PLA 的结晶速率。由图 5 还可以发现,晶体不再

像 A 材料一样为规整的球晶,而是不规则的球晶晶体,这是因为晶核的增多使得结晶速率加快,相邻晶体之间发生生长竞争,在一定的空间内,球晶生长至一定尺寸后会发生相互挤压,使得其形成形状不规则的球形晶体,且每个晶体之间都可以观察到明显的晶界存在。C 材料的晶体最小,说明先共混 PLA 和 PBS 两组分,再添加 PEG,对晶粒的改善效果最佳。



试样: a—A; b—B; c—C; d—D; e—E

图5 不同加料顺序的 PLA/PBS/PEG 共混物的 POM 照片

3 结论

(1) SEM 分析表明,PEG 添加至 PLA/PBS 基体,可以均化分散相尺寸,降低体系的界面张力;先共混 PLA 和 PBS,最后再加入 PEG 时,三种材料完全看不出界面,相容性是共混物中最优的。

(2) XRD 测试与 POM 照片说明,PEG 可以起到增塑作用,增强基体间的结合力,细化晶粒尺寸,提高 PLA/PBS/PEG 共混物的结晶能力;先共混 PLA 和 PBS 两组分,再添加 PEG 能更好地发挥 PEG 的增塑作用,分子之间的结合力增强,从而提高共混物的结晶能力。

(3) TG 分析表明,PEG 的加入减弱了 PLA 与 PBS 间分子间作用力,分子链柔性增强,形成了互穿交联网络结构;先共混 PLA 和 PBS,最后再加入

PEG 的方法,提高了 PLA 材料强度,故具有更高的热稳定性。

(4) PLA 和 PBS 熔融混合均匀后再加入 PEG,可以避免 PEG 的过度氧化,保证 PEG 可以更好地增强 PLA/PBS 界面相容性,从而使 PLA/PBS/PEG 共混物的拉伸性能进一步提高。

参考文献

- [1] Palai B, Mohanty S, Nayak S K. Synergistic effect of polylactic acid(PLA) and poly(butylene succinate-co-adipate)(PBSA) based sustainable, reactive, super toughened eco-composite blown films for flexible packaging applications[J]. *Polymer Testing*, 2020, 83(6):336–343.
- [2] 杨永潮,李翔宇,张清清,等. 聚乙二醇含量对聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯合金结构与性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(3):73–78.
Yang Yongchao, Li Xiangyu, Zhang Qingqing, et al. Effects of polyethylene glycol contents on microstructure and properties of polylactic acid/polybutylene succinate blends[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(3):73–78.
- [3] Barletta M, Puopolo M. Thermoforming of compostable PLA/PBS blends reinforced with highly hygroscopic calcium carbonate[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56(12):126–131.
- [4] 张也,佟毅,李义,等. 聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯/二氧化碳基热塑性聚氨酯三元薄膜的制备与性能研究[J]. *塑料工业*, 2018, 46(1):99–103, 146.
Zhang Ye, Tong Yi, Li Yi, et al. Study on preparation and properties of PLA/PBS /thermoplastic poly(propylene carbonate) polyurethane blown films[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(1):99–103, 146.
- [5] 颜颖达,赵珊,阳范文,等. PLA/PBAT 共混体系的制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(11):36–41, 46.
Yan Yingda, Zhao Shan, Yang Fanwen, et al. Preparation and properties of PLA/PBAT blends[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(11):36–41, 46.
- [6] 李翔宇,郭宇芳,张清清,等. PEG 对 PLA/PBS 共混物结构与性能的影响[J]. *塑料*, 2019, 48(6):46–50, 61.
Li Xiangyu, Guo Yufang, Zhang Qingqing, et al. Effect of PEG on microstructure and properties of PLA/PBS blend[J]. *Plastic*, 2019, 48(6):46–50, 61.
- [7] 丁跃,卢波,季君晖. 聚乳酸基生物可降解材料的相容性[J]. *化学进展*, 2020, 32(6):738–751.
Ding Yue, Lu Bo, Ji Junhui. Compatibilization strategies of PLA-based biodegradable materials[J]. *Progress in Chemistry*, 2020, 32(6):738–751.
- [8] 宫贵贞,徐文,陈艳,等. 聚乙烯醇/改性纳米蒙脱土复合材料的制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(1):119–122, 135.
Gong Guizhen, Xu Wen, Chen Yan, et al. Preparation and properties of polyvinyl alcohol/modified nano-montmorillonite composites[J].

- Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):119–122, 135.
- [9] 辜婷, 郑强, 朱大勇, 等. 投料方式对聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯共混物热性能及流变性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(12):71–77, 84.
- Gu Ting, Zheng Qiang, Zhu Dayong, et al. Influence of thermal properties and rheological properties of feeding on PBS/PLA blends materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(12):71–77, 84.
- [10] Aversa C, Barletta M, Puopolo M, et al. Cast extrusion of low gas permeability bioplastic sheets in PLA/PBS and PLA/PHB binary blends[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2020, 59(3):265–269.
- [11] Coltelli M B, Vannozzi A, et al. Flat die extruded biocompatible poly(lactic acid)(PLA)/poly(butylene succinate)(PBS) based films[J]. Polymers, 2019, 11(11):365–372.
- [12] 唐海龙, 陈惠灼, 徐文华, 等. 体积拉伸形变对 PLA/PBS 共混物结构与性能的影响[J]. 塑料工业, 2016, 44(7):43–46.
- Tang Hailong, Chen Huizhuo, Xu Wenhua, et al. Effect of volume elongational deformation on structure and properties of PLA/PBS blends[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(7):43–46.
- [13] 涂鸿轶, 张云飞, 黄安平, 等. 硅灰石填充 PLA/PBAT 复合材料制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(9):24–31.
- Tu Hongyi, Zhang Yunfei, Huang Anping, et al. Preparation and properties of wollastonite filled PLA/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9):24–31.
- [14] Qiu Shuo, Zhou Yikai, Geoffrey I N, et al. Optimizing interfacial adhesion in PBAT/PLA nanocomposite for biodegradable packaging films[J]. Food Chemistry, 2021, 334. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127487.
- [15] 朱大勇, 辜婷, 郑强, 等. 亚磷酸三苯酯对聚乳酸/聚丁二酸丁二醇酯共混体系性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(4):43–48.
- Zhu Dayong, Gu Ting, Zheng Qiang, et al. Effect of triphenyl phosphite on the properties of PLA/PBS blend system[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(4):43–48.
-
- (上接第 72 页)
- [11] Gunduz I E, McClain M S, Cattani P, et al. 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22:98–103.
- [12] Hong S, Sanchez C, Du H, et al. Fabrication of 3D printed metal structures by use of high-viscosity Cu paste and a screw extruder[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(3):836–841.
- [13] Kebede A T, Balasubramanian E, Praveen A S, et al. Preliminary investigations on extrusion of high viscosity slurry using direct writing technique[J]. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 2020, 11. DOI:10.1051/smdo/2020012.
- [14] Gunduz I E, McClain M S, Cattani P, et al. 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22:98–103.
- [15] 冶峻峰, 郭明森, 邢晓红, 等. 高频振动辅助的 FDM 3D 打印喷头结构设计及其实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2):73–77.
- Ye Junfeng, Guo Mingsen, Xing Xiaohong, et al. Structural design and experimental study of FDM 3D printing nozzle assisted by high frequency vibration[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(2):73–77.
- [16] 陈文芳, 蔡扶时. 非牛顿流体的一些本构方程[J]. 力学学报, 1983(1):16–26.
- Chen Wenfang, Cai Fushi. Some constitutive equations of non-newtonian fluids[J]. Journal of Mechanics, 1983(1):16–26.
- [17] 彭岩, 吕冰海, 纪宏波, 等. 非牛顿流体材料在工业领域的应用与展望[J]. 轻工机械, 2014, 32(1):109–114.
- Peng Yan, Lyu Binghai, Ji Hongbo, et al. Application and prospect of non-newtonian fluid materials in industry[J]. Light Industry Machinery, 2014, 32(1):109–114.
- [18] 陈从平, 董小刚, 张涛. 非牛顿流体微挤出过程动态建模与数值仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(9):108–111.
- Chen Congping, Dong Xiaogang, Zhang Tao. Dynamic modeling and numerical simulation of non-newtonian fluid micro-extrusion process[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(9):108–111.
- [19] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Zhou Guangjiong, Yan Zongyi, Xu Shixiong, et al. Fluid mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.