

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.026

PLA/PBAT 复合材料增容增塑的研究进展

张佰城, 郑雨欣, 许珂, 黄兆阁

(青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266042)

摘要: 简述了近几年国内外聚乳酸(PLA)/聚对苯二甲酸-乙二酸丁二酯(PBAT)复合材料增容改性及增塑改性的研究进展, 并对其增容改性及增塑改性的方式进行归纳分类。PLA是一种具有高模量和低韧性的热塑性脂肪族聚酯, 能与高韧性和可生物降解的脂肪族共聚酯 PBAT 共混实现优势互补。笔者阐述了反应型相容剂、接枝或嵌段共聚物对 PLA/PBAT 共混体系的增容机理以及改性效果, 总结了增塑剂的种类以及对 PLA/PBAT 共混体系力学性能和界面结构的影响。最后提出当前增容改性及增塑改性存在的弊端, 并对 PLA/PBAT 复合材料增容增塑改性的未来研究趋势进行展望。

关键词: 聚乳酸; 聚对苯二甲酸-乙二酸丁二酯; 增容改性; 增塑改性; 研究进展

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0165-05

Research Progress on Capacitation and Plasticization of PLA/PBAT Composites

Zhang Baicheng, Zheng Yuxin, Xu Ke, Huang Zhaoge

(College of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract : The research progress of polylactic acid (PLA)/polybutylene terephthalate-butylene glycol glycol (PBAT) composites in recent years and the feasibility modification and plasticization modification of PLA/PBAT composites were briefly described, and the methods of capacitation modification and plasticization modification were summarized. PLA is a thermoplastic aliphatic polyester with high modulus and low toughness, which can be blended with high toughness and biodegradable aliphatic copolyester PBAT to achieve complementary advantages. In this paper, the capacitation mechanism and modification effect of reactive compatibilizers, grafted or block copolymers on PLA/PBAT blends were described, and the types of plasticizers and their effects on the mechanical properties and interface structure of PLA/PBAT blends were summarized. Finally, the disadvantages of current capacity augmentation modification and plasticization modification were proposed, and the future research trend of PLA/PBAT composite capacitation and plasticization modification was prospected.

Keywords : polylactic acid ; polybutylene terephthalate-ededioate ; capacity augmentation modification ; plasticization modification ; research progress

近年来, 由于温室气体加剧, 全球环境问题日益严重, 利用可生物降解塑料代替传统不可降解塑料以解决环境污染问题成为研究人员的攻坚方向^[1]。聚乳酸(PLA)是由乳酸或丙交酯为单体聚合而成, 原料丰富可再生且价格低廉^[2], 是一种具有良好力学性能、加工性、透明性、堆肥性和生物相容性的刚性材料^[3], 在环保、纺织、3D打印、生物医疗、电子产品缓冲包装等领域有广阔应用前景^[4-6]。然而, PLA也存在一些缺陷, 如结晶速度慢、玻璃化转变温度(T_g)低, 拉伸断裂应

变不到 10%, 冲击强度相对较低, 这些缺陷限制了其在某些领域的应用发展^[7]。因此, 通过对 PLA 及其复合材料进行增塑改性, 提高材料的韧性和加工性能以弥补其缺陷。

聚对苯二甲酸-乙二酸丁二酯(PBAT)由 1,4 丁二醇、己二酸和对苯二甲酸单体聚合而成^[8]。PBAT 具有支链长、相对分子质量高等特点, 具有高达 230 °C 的热稳定性和良好的透明度。由于其脂肪链及苯环的存在, PBAT 的拉伸断裂应变高达 560%~710%, 拉伸强度可达 35~45 MPa^[9], 因其可生

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE079)

通信作者: 黄兆阁, 硕士, 副教授, 主要从事高分子材料高性能化研究

收稿日期: 2023-10-22

引用格式: 张佰城, 郑雨欣, 许珂, 等. PLA/PBAT 复合材料增容增塑的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 165-169.

Zhang Baicheng, Zheng Yuxin, Xu Ke, et al. Research progress on capacitation and plasticization of PLA/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 165-169.

物降解被广泛应用于农用地膜和环保垃圾袋等方面^[10]。

将PLA与PBAT共混,在保持每种材料自身优点的同时弥补缺陷,形成综合性能良好的可降解PLA/PBAT复合材料,以扩大材料的应用范围^[11]。但由于PLA与PBAT的分子结构差异以及溶解度参数相差较大,二者共混时的相容性较差^[12],会产生宏观的相分离,形成分层或剥离现象,应力在共混体系内的传递效率变差导致了材料的强度和使用性能下降^[13],因此对PLA/PBAT共混体系进行增容改性成为制备优异综合性能的PLA/PBAT复合材料的关键^[14]。

1 增容改性

目前在PLA/PBAT复合材料中加入相容剂是增容改性最简洁高效的办法,相容剂的作用是通过降低PLA与PBAT的界面能,减小分散相的尺寸,从而形成稳定的共连续相形态^[15]。

1.1 反应型相容剂

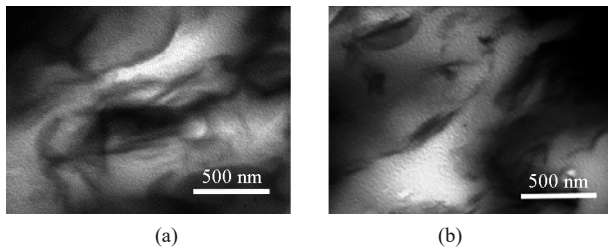
反应型相容剂具备与PLA和PBAT发生反应的基团,高温共混时伴随着化学反应的发生,导致其结晶度下降,界面张力减小,从而使共混体系分散均匀。反应型相容剂的两端连接着PLA与PBAT,不仅能改善相容性,还能起到增塑的作用^[16]。

(1)端羟基、端羧基与环氧基反应生成PLA-PBAT共聚酯。

Wang等^[17]采用环氧端支化聚合物(ETBP)作为界面相容剂,对PLA/PBAT共混物进行了改性。加入ETBP后,ETBP中的环氧基与PLA和PBAT的羟基反应形成化学交联结构,玻璃化转变温度(T_g)相差变小,共混物的拉伸断裂应变从45.8%提高到272%,冲击强度从26.2 kJ/m²提高到45.3 kJ/m²。这些结果表明ETBP可以有效地提高PLA/PBAT的相容性。

Liu等^[18]采用熔融纺丝法制备了环氧功能化石墨烯改性PLA/PBAT复合单丝,利用石墨烯上的环氧基团分别与PLA与PBAT的羟基和羧基反应。通过扫描电子显微镜(SEM)证实了PLA与PBAT的相容性得到了改善,动态力学分析(DMA)表明随着石墨烯质量分数的增加,PLA和PBAT的 T_g 差值减小,此外,当环氧功能化石墨烯质量分数为0.2%时,复合单丝的拉伸强度提高了22.2%,拉伸弹性模量提高了63.2%。

Kumar等^[19]等采用熔融共混法制备了PLA/PBAT纳米复合材料,甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)作为反应性相容剂分布在PLA与PBAT的相界面,环氧基与端羟基和端羧基反应形成酯键来改善PLA/PBAT的界面性能。加入质量分数为5%的GMA可以使共混物的拉伸弹性模量提升了39.2%,冲击性能提升51.7%,通过图1中透射电子显微镜(TEM)图观察到黏土插层(C20A)的剥离分散,结晶热与熔融焓的降低也证实了GMA与聚合物之间的反应增强了PLA与PBAT之间的界面黏附性,这进一步证实了GMA改善了界面相容性。



a—PLA/PBAT/C20A; b—PLA/PBAT/GMA/C20A

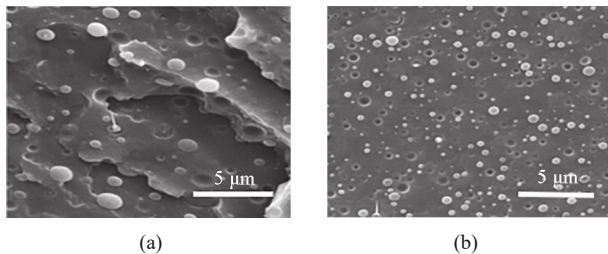
图1 PLA/PBAT纳米复合材料的TEM图

(2)酯交换反应生成PLA-PBAT共聚酯。

Su等^[20]以钛酸四丁酯(TBT)作为催化剂,通过PLA与PBAT的酯交换反应制备了催化剂母粒。将两种聚合物与催化剂母粒组合在一起加工成吹塑薄膜和板材。图2低温断裂板材样品的SEM图表明,分散相的颗粒尺寸减小。差示扫描量热(DSC)分析测得 ΔT_g 的减小也证实了PLA与PBAT的相容性得到改善。在横向和机械方向上,拉伸断裂应变分别提高了85%和93%,加入质量分数2%的催化剂母粒显著提高了薄膜的拉伸断裂应变和抗撕裂传播能力,同时也使其获得了较高的各向同性。

He等^[21]采用熔融共混法制备了PLA/PBAT/有机改性蒙脱土(MMT)可生物降解聚合物共混物。结果表明,蒙脱土较好地定位在PLA/PBAT的界面上,MMT与PLA和PBAT发生了酯交换反应,相容性的改善促进了共混物的结晶,提高了PLA与PBAT的热稳定性。此外,蒙脱土的加入提高了聚乳酸的断裂伸长率和冲击强度,当聚合物处于强制拉伸状态时,蒙脱土与聚乳酸的界面会形成孔洞,阻止裂纹进一步扩展。

Lin等^[22]在PLA与PBAT熔融挤出过程中加入改性蒙脱土(TMT),所得复合材料的拉伸强度、拉伸断裂应变和冲击强度均得到提升,由图2可知,随着TMT的加入,PLA与PBAT发生酯交换反应,PLA与PBAT的界面相容性变好,在TMT质量分数达到0.5%时断面较为粗糙。



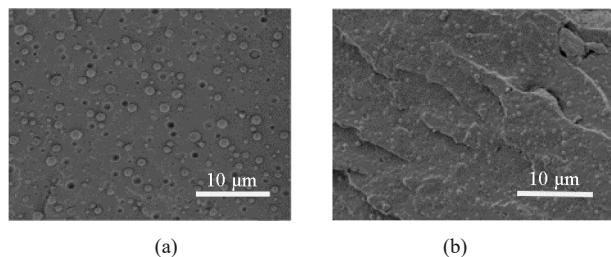
a—PLA/PBAT(80/20); b—PLA/PBAT/TMT(80/20/0.5)

图2 PLA/PBAT复合板材低温断裂面的SEM图

Coltelli等^[23]以钛酸四丁酯[Ti(OBu)₄]为催化剂,研究了PLA与PBAT熔融共混过程中的酯交换反应。通过SEM图观察到Ti(OBu)₄的加入使PBAT分散相颗粒尺寸显著减小。此外,随着共混时间的增加,其硬度降低,断裂伸长率增加,这与相容性提升的特征基本吻合。

(3)自由基引发剂引发原位反应生成PLA-PBAT共聚酯。

Wu等^[24]以过氧化二异丙苯(DCP)作为自由基引发剂,原位增容制备了PLA/PBAT共混物。DCP受热分解形成初级自由基,初级自由基可从PLA和PBAT大分子链上夺取1个氢原子,形成PBAT和PLA长链自由基,两种自由基偶合形成PLA-PBAT支化或交联共聚物。结果表明,加入DCP后共混物的拉伸强度和屈服强度分别提高了48.4%和22.1%,图3中SEM图显示加入质量分数0.3%的DCP后,分散相粒径明显减小,界面间隙也几乎消失。由于PBAT-g-PLA共聚物的形成提高了界面黏附性,从而提高了PLA/PBAT共混体系的相容性和力学性能。复数黏度的提高也证实了共混体系支化或交联的形成。



a—PLA/PBAT(80/20); b—PLA/PBAT/DCP(80/20/0.3)

图3 PLA/PBAT复合材料的低温断裂面SEM图

何和智等^[25]利用过氧化苯甲酰(BPO)通过三螺杆挤出机制备了原位增容PLA/PBAT共混物。在BPO的作用下,PLA/PBAT共混物的红外光谱图在 2945 cm^{-1} 处的峰面积出现减小,说明BPO在受热分解形成初级自由基的夺氢作用下,PLA与PBAT中的部分亚甲基消失生成自由基链,导致了亚甲基的伸缩振动峰面积减小。通过DSC曲线观察到随着BPO的加入,PLA/PBAT共混体系的 T_g 与熔融温度(T_m)明显增加,说明了共混体系发生了更多支化或交联,相容性的改善使PLA/PBAT共混物的熔融消耗了更多热量从而使 T_m 得到了提升。曲线的熔融肩峰消失也说明PLA与PBAT两相都相容性变好。

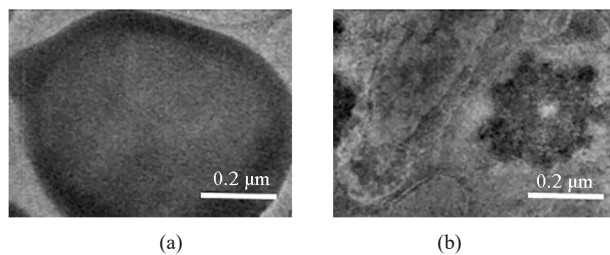
1.2 接枝或嵌段共聚物

相关研究表明,在PLA/PBAT共混体系中加入适当的接枝或嵌段共聚物,可以有效的改善两组分的相容性,增加界面黏合力,从而使共混体系的物理力学性能得到提升^[26]。

(1)嵌段共聚物。

Ding等^[27]合成了单甲氧基聚乙二醇-聚乳酸(MPEG-PLA)二嵌段共聚物,用于增容PLA/PBAT共混体系。由于聚醚结构的短链和与PBAT相似的溶解度参数,MPEG与PBAT具有良好的相容性。通过观察SEM图发现,加入MPEG-PLA的共混物断面出现纤维结构,这主要是由于MPEG-PLA提高了PLA和PBAT的界面黏附力。由图4可知,添加MPEG-PLA二嵌段共聚物后,共混物中PBAT在PLA基体中的分散尺寸由 $2\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,共混体系从海岛结构转变为共连续结构。

Ding等^[28]合成了不同链长PLA嵌段的PLA-PBAT-PLA三嵌段共聚物(长链HPB和短链LPB)作为相容剂来改善



a—PLA/PBAT共混物;b—PLA/PBAT/MPEG-PLA共混物

图4 PLA/PBAT复合材料的TEM图

PLA与PBAT的相容性。相关研究表明,三嵌段共聚物或多嵌段共聚物在界面处的存在可降低两种不混溶共混物的界面张力,乳化相界面以改善PLA/PBAT共混体系的相形态和界面附着力。添加质量分数5% HPB相容剂的PLA/PBAT共混物的拉伸断裂应变是原共混物的7倍。在SEM图上可以清晰地看到,随着嵌段共聚物的含量增加,分散相的粒径尺寸从 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,相界面逐渐模糊。DMA曲线显示PLA与PBAT的损耗因子($\tan\delta$)峰位随着嵌段共聚物含量的增加而相互靠近,以上结果均表明PLA-PBAT-PLA三嵌段共聚物改善了共混体系的相容性。

(2)接枝共聚物。

Phetwarotai等^[29]通过合成PLA-g-MA接枝共聚物作为PLA和PBAT的相容剂。PLA-g-MA中的二酸酐基团可与PBAT的端羟基反应,生成PLA-g-PBAT共聚物,同时PLA-g-MA与PBAT存在着偶极-偶极相互作用,也有助于共混体系相容性的改善。与PLA/PBAT复合材料相比,加入PLA-g-MA的PLA/PBAT复合材料的拉伸强度、拉伸断裂应变、冲击强度均有所提高,当PLA-g-MA质量分数达到3%时拉伸性能达到最佳。拉伸断裂面的SEM图表明加入PLA-g-MA的共混物的纤维更长,DSC与热重分析结果表明,改性后的共混物相容性与热性能都得到了提高。周志斌等^[30]也研究了PLA-g-MAH接枝共聚物对PLA/PBAT复合材料的形态结构及性能的影响,SEM图显示,加入接枝物后PLA/PBAT复合材料的两相间的界面明显变得模糊,冲击强度及拉伸断裂应变得到提升,另外PLA-g-MAH的加入提高了共混物的生物降解性能。

谢丽锦等^[31]将环氧树脂(EP)、DCP、马来酸酐(MAH)作为共同接枝单体,通过熔融共混法制备了PLA-g-MAH/EP接枝共聚物,以作为PLA/PBAT复合材料的增容剂。SEM图显示,添加相容剂后PBAT在PLA基体相得到了有效分散,PLA与PBAT两相之间的相容性得到提高。DSC结果表明添加PLA-g-MAH/EP接枝物作为增容剂后,复合材料的双重熔融峰消失。同时DMA曲线表明复合材料加入接枝物后的界面强度增加。力学性能测试发现,加入接枝物后复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度得到有效提升。

2 增塑改性

PLA是线性分子,相对分子质量较小且分布较宽,导致PLA韧性较差,在合成PLA/PBAT复合材料时加入适量增塑

剂可增强其柔韧性,提升PLA/PBAT复合材料的力学性能及加工性能,使其更易成型。

2.1 小分子增塑剂

小分子增塑剂的增塑机理是通过增塑剂的小分子插入到聚合物分子链之间,破坏了分子间的氢键,削弱了聚合物分子链间的应力,增加了聚合物分子链的活动性,结晶度和 T_g 降低,从而达到了增塑效果。常见的小分子增塑剂包括:柠檬酸酯类、乙酸甘油酯类等^[32-33]。

(1)柠檬酸酯类增塑剂。

柠檬酸酯是一种绿色环保型增塑剂,具有增塑性能优良、相容性好、挥发性小等优点,在动物实验中表现出低毒或无毒性,并且有较好的生物降解性,可完全代替邻苯二甲酸二辛酯(DOP)等传统增塑剂。

Quero等^[34]采用双螺杆挤出机制备了PLA/PBAT复合材料,并使用乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC)作为增塑剂,对共混体系的等温冷结晶动力学进行研究。数据表明ATBC使体系塑化,熔体黏度降低导致扭矩值变小。通过DSC和DMA曲线分析,随着ATBC的加入,PLA与PBAT的 T_g 、 T_m 均向低温移动,共混物的冷结晶温度降低,由于增塑过程引起的分子迁移率的增加,ATBC的加入明显提高了整体结晶速率。

Phetwarotai等^[35]以柠檬酸三乙酯(TEC)为增塑剂、甲苯二异氰酸酯(TDI)为相容剂,用双螺杆挤出机对PLA与PBAT进行共混。结果表明,随着TEC含量的增加,PLA增塑膜的拉伸断裂应变显著增加,DSC数据显示PLA的 T_g 和冷结晶温度(T_c)显著降低,但热稳定性略有下降。共混体系中的TEC和TDI不仅协同提高了PLA/PBAT共混体系的拉伸性能和冲击强度,而且由于分子链迁移率的提高,PLA/PBAT复合材料的结晶度增加且冷结晶速率提高。

Phetwarotai等^[36]为获得同时具备优异力学性能与阻燃性能的PLA/PBAT共混物,在体系中同时加入磷酸三甲酯(TCP)和TEC以提高增容共混物的阻燃性、柔韧性和冲击韧性。当TEC添加的质量分数大于10%时,共混物的拉伸断裂应变提高了130%以上,但拉伸强度有所降低。TEC用量在5份时共混物的冲击强度仅为8.2 kJ/m²,当TEC用量为20份时,共混物的冲击强度达到了56.0 kJ/m²。在共混物中同时加入20份的TCP和5份的TEC,比单独加入20份TCP和5份TEC的复合材料具有更高的拉伸断裂应变及冲击强度,说明二者具有改善拉伸性能和抗冲击性能的协同效应。

(2)甘油酸酯类增塑剂。

Kim等^[37]采用吹膜挤出工艺对PLA/PBAT包装薄膜的力学性能和撕裂性能进行研究。结果表明己二酸酯既提高了薄膜的柔韧性,又提高了PLA与PBAT的相容性。力学性能测试表明己二酸酯的加入使拉伸断裂应变得到了提升,加入10份的己二酸酯使其机械方向的撕裂强度从4.63 N/mm提高到8.67 N/mm,横向的撕裂强度从13.19 N/mm提高到16.16 N/mm。DMA曲线显示,tan δ 峰位随着己二酸酯含量的增加向低温方向移动,其余增塑剂没有引起tan δ 的显著变

化。这一结果与己二酸和己二酸酯增塑PLA的研究结果一致^[38]。增塑剂含量的增加使PLA的自由体积和链迁移率增加,导致tan δ 峰向低温方向移动,结果证实了己二酸酯的增塑作用。

2.2 大分子增塑剂

大分子增塑剂的增塑机理也可以理解为结构增塑机理,指增塑剂与聚合物未达到分子水平的混容,但其链段能均匀地分布在聚合物超分子结构基本单元之间,使一部分相邻高分子链间的作用力减弱,促进大分子聚集体的相对滑移^[39],从而使高分子材料具有流动性,拉伸断裂应变提高。

Aranberri等^[39]将无毒的大分子增塑剂聚乙二醇(PEG)加入到PLA/PBAT/羽毛共混物中,并对其力学性能、热稳定性和热扩散率进行了研究。PEG分子链段均匀分布在共聚物的分子链之间,使相邻分子链间的作用力减弱,从而使复合材料的拉伸断裂应变提升,拉伸强度和拉伸弹性模量降低。由于PEG的增塑作用,共混物的 T_g 降低,PLA的结晶度提升。

黄睿等^[40]利用溶液共混法将聚丙二醇(PPG)包覆在功能化纤维素纳米纤维(CNF)表面以制备CNF-PPG纳米粒子,并用溶液浇铸法制备了PLA/PBAT/CNF-PPG复合薄膜。结果表明PPG作为增容剂使PLA、PBAT基体间的相容性显著增强,相分离程度大幅降低。当共混体系中CNF-PPG纳米粒子添加质量分数在10%时,薄膜的在机械、热稳定、阻隔方面均表现出优异的性能。

2.3 植物基增塑剂

植物基增塑剂是利用大豆、淀粉、玉米秸秆等可再生植物资源,通过酸解、酶解、催化、脱水等工序制造而成。植物基增塑剂通常无毒无异味,具有很好的环保性。

Aldas等^[41]利用松香胶(GR)作为增塑剂来提升PLA与PBAT的断裂韧性及相容性,通过实验研究发现GR可以降低PBAT的溶解度参数^[42]。DSC分析表明PLA的 T_m 和 T_g 分别下降了8℃和5.3℃,说明GR的加入使PLA的加工性得到改善。GR的塑化作用使PBAT结构域结合到PLA基质中,GR的加入使拉伸强度、冲击韧性及弯曲弹性模量都得到了改善。在包装薄膜的应用方面,PLA-PBAT-GR薄膜是透明的,发光值非常接近于PLA,因此所得到的薄膜具有很好的视觉外观。

Klinmalai等^[43]通过在PLA/PBAT共混膜中加入香芹酚来增强可持续包装材料的抗菌能力以延长食品的保质期,香芹酚中的C=O键可与PLA与PBAT的端基相互作用,对共混薄膜的力学性能起到明显的提升作用。当PLA与PBAT共混比为70/30时,质量分数为5%香芹酚的加入显著提升了共混材料的拉伸断裂应变。加入2%香芹酚后,相比于纯共混薄膜,食品包装袋有效的延长的烘焙产品的保质期,说明香芹酚作为增塑剂与抗菌剂在食品包装方面具有不错的应用前景。

Sun等^[44]以PLA、PBAT和季铵盐改性纤维素纳米晶

(SCNC)为原料,采用共混沉淀法制备了多功能复合膜。SCNC的加入不仅起到了增塑作用,还抑制了PBAT的聚集,改善了PLA与PBAT的相容性。加入0.5%SCNC后的拉伸断裂应变相比PLA膜提高了116.2%。加入SCNC后,PLA/PBAT/SCNC复合膜的水蒸气透过率比PLA降低了74%,并且复合膜的抗紫外线性能也得到显著提高。

3 结语

塑料在日常生活产品、工程产业、国防科技等领域被广泛应用,但由于大部分的石油基塑料不可降解,对人类的生态环境有着不可逆的负面影响,采用生物降解塑料替代石油基塑料成为必然趋势,PLA与PBAT作为两大生物降解塑料已经成为国内外科研人员的主流研究材料。笔者综述了国内外对PLA/PBAT复合材料增容及增塑的研究进展,通过增容改性、增塑改性及共混改性的协同作用,根据实际需要加入助剂或填料从而定向地改善复合材料的综合性能是PLA/PBAT复合材料未来发展的重要方向。目前部分增容剂及增塑剂还存在着生产成本高、无法工业化、具有毒性等缺陷,在未来该领域的研究中,应秉持可持续发展的理念,寻找低成本可降解的绿色新型相容剂及增塑剂,拓展功能化生物降解材料的发展及应用。

参考文献

- [1] Shafqat A, et al. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(3): 1 739–1 749.
- [2] Mokhena T C, et al. Polymers, 2018, 10(12). DOI: 10.3390/polym10121363.
- [3] Tsou C H, et al. Bio-Medical Materials and Engineering, 2015, 26 (S1):S147–S154.
- [4] Ilyas R A, et al. Polymers, 2021, 13. DOI: 10.3390/polym13081326.
- [5] 薛溪睿. 山东化工, 2022, 51(16):100–103.
Xue Xirui. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(16):100–103.
- [6] 孙浩程, 等. 现代塑料加工应用, 2021, 33(1):56–59.
Sun Haocheng, et al. Modern Plastic Processing Application, 2021, 33(1):56–59.
- [7] Zhao X, et al. RSC Advances, 2020, 10(22):13 316–13 368.
- [8] Burford T, et al. Physical Sciences Reviews, 2023, 8(8): 1 127–1 156.
- [9] Mahata D, et al. Polymer Science, 2021, 63:102–111.
- [10] Qiao R, et al. Mini-Reviews in Organic Chemistry, 2022, 19(5): 608–616.
- [11] Su S. Polymers, 2021, 13(14). DOI:10.3390/polym13213686.
- [12] Aversa C, et al. European Polymer Journal, 2022, 173. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111304.
- [13] Xu C, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27: 1 273–1 284.
- [14] Fernandes T M D, et al. Polymer Bulletin, 2019, 76:2 899–2 913.
- [15] Sun J, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023, 36(3):1 175–1 186.
- [16] 史向阳, 等. 包装工程, 2023, 44(3):61–72.
Shi Xiangyang, et al. Packaging Engineering, 2023, 44(3):61–72.
- [17] Wang B, et al. Polymers, 2020, 20(1):39–54.
- [18] Liu W, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20:3 784–3 795.
- [19] Kumar M, et al. Bioresource Technology, 2010, 101(21): 8 406–8 415.
- [20] Su S. Materials Research Express, 2022, 9(2). DOI:10.1088/2053-1591/ac55c7.
- [21] He H, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2022, 35(4):503–520.
- [22] Lin S, et al. Materials & Design, 2012, 36:604–608.
- [23] Coltelli M B, et al. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96 (5):982–990.
- [24] Wu D, et al. Journal of Polymer Engineering, 2021, 41(2):95–108.
- [25] 何和智, 等. 塑料, 2019, 48(6):1–5.
He Hezhi, et al. Plastics, 2019, 48(6):1–5.
- [26] 张涛. 反应型相容剂与复合型相容剂对共连续相形态影响规律的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
Zhang Tao. Effect of reactive of complex compatibilizer on co-continuous morphology development[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [27] Ding Y, et al. European Polymer Journal, 2019, 118:45–52.
- [28] Ding Y, et al. Polymer Degradation and Stability, 2018, 147: 41–48.
- [29] Phetwarotai W, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183:346–357.
- [30] 周志斌, 等. 包装学报, 2016, 8(2):8–14.
Zhou Zhibin, et al. Journal of Packaging, 2016, 8(2):8–14.
- [31] 谢丽锦, 等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(7):74–80.
Xie Lijin, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(7):74–80.
- [32] Phetwarotai W, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183:346–357.
- [33] 郝艳平. 聚乳酸增塑与聚对苯二甲酸丁二醇酯增韧改性研究[D]. 吉林:吉林大学, 2016.
Hao yanping. Study on plasticization of poly(L-lactide) and toughening of poly(butylene terephthalate)[D]. Jilin : Jilin University, 2016.
- [34] Quero E, et al. Macromolecular Chemistry and Physics, 2012, 213 (1):36–48.
- [35] Phetwarotai W, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2019, 37:68–78.
- [36] Phetwarotai W, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(9):2 094–2 107.
- [37] Kim D Y, et al. Polymers, 2020, 12(9). DOI: 10.3390/polym12091904.
- [38] Martino V P, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112 (4):2 010–2 018.
- [39] Aranberri I, et al. Polymers, 2017, 9(11). DOI: 10.3390/polym9110593.
- [40] 黄睿, 等. 精细化工, 2023, 40(6):1 253–1 263.
Huang Rui, et al. Fine chemicals, 2023, 40(6):1 253–1 263.
- [41] Aldas M, et al. Polymers 2021, 13. DOI:10.3390/polym13121913.
- [42] Aldas M, et al. polymers 2021, 13. DOI:10.3390/polym13091506.
- [43] Klinmalai P, et al. LWT, 2021, 152. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112356.
- [44] Sun C, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2022, 30 (8):3 139–3 149.