

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.008

聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物 共混体系的性能

徐蒙蒙¹, 尹朝辉², 阳范文¹, 张雅欣¹, 高月敏¹, 魏悦姿¹, 邱康寿¹,
王晨光¹, 梁毓¹, 田秀梅¹, 陈晓明¹, 王治伟³, 周苗⁴

(1. 广州医科大学基础学院生物医学工程系, 广州 511436; 2. 江西中辉新材料有限公司, 江西新余 338019;
3. 广州医科大学附属顺德医院, 广东顺德 528315; 4. 广州医科大学附属口腔医院, 广州 510500)

摘要: 采用熔融共混制备聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物增塑聚乳酸, 研究聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量对聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系流变性能、力学性能、热性能和微观结构的影响。当添加聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数为20%时, 聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的熔体流动速率为15.6 g/(10 min), 比未增塑时提高约9倍, 断裂伸长率为341.86%, 撕裂强度为23.7 N/cm, 拉伸强度为44.5 MPa, 玻璃化转变温度从纯聚乳酸的60.1℃降到26.9℃。随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量的增加, 共混体系的拉伸强度先下降后升高, 断裂伸长率呈上升趋势, 撕裂强度先下降后上升最后渐趋于稳定, 聚乳酸链段的活动能力增强, 增塑效果明显。扫描电子显微镜分析表明, 当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物质量分数≥12%时, 共混体系脆冷断面的褶皱、粗糙度和裂纹明显增加, 吸收能量能力增强, 表现为断裂伸长率和撕裂强度提高。

关键词: 聚乳酸; 聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物; 共混; 增塑; 力学性能; 流变性能

中图分类号: TQ336.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)08-0040-06

Properties of PLA/Polyoxyethylene-polyoxypropylene Ether Block Copolymer Blends

Xu Mengmeng¹, Yin Zhaohui², Yang Fanwen¹, Zhang Yaxin¹, Gao Yuemin¹, Wei Yuezi¹, Qiu Kangshou¹,
Wang Chenguang¹, Liang Yu¹, Tian Xiumei¹, Chen Xiaoming¹, Wang Zhiwei³, Zhou Miao⁴

(1. Department of Biomedical Engineering, School of Basic Medical Sciences, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China;
2. Jiangxi Zhonghui New Material Co., Ltd., Xinyu 338019, China; 3. Affiliated Shunde Hospital of Guangzhou Medical University,
Shunde 528315, China; 4. Affiliated Stomatology Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510500, China)

Abstract: The plasticized polylactic acid (PLA) was prepared by melt blend with polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer as plasticizer. The effects of polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer content on the rheological properties, mechanical properties, thermal properties and microstructure of the PLA/polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer blends were studied. When the mass fraction of polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer is 20%, the melt flow rate of the blend is 15.6 g/(10 min), which is about 9 times higher than that without plasticization, the elongation at break is 341.86%, the tear strength is 23.7 N/cm, the tensile strength is 44.5 MPa, the glass transition temperature decreases from 60.1℃ of pure PLA to 26.9℃. With the increase of the amount of polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer, the tensile strength of the blend first decreases and then increases, the elongation at break shows an upward trend, the tearing strength first decreases and then increases and finally stabilizes, the activity of PLA chain segments is enhanced, and the plasticizing effect is obvious. SEM analysis show that when the content of polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer is more than or equal to 12%, the wrinkles, roughness and cracks of the brittle-cold section of the blends increase significantly because energy ab-

基金项目: 广东省重大科技专项 (2017B090911012), 广州市高校创新创业平台建设重点项目 (201709P05)

通讯作者: 阳范文, 博士, 教授, 主要从事生物医学高分子材料研究与应用 E-mail: yangfanwen@163.com

收稿日期: 2018-05-31

引用格式: 徐蒙蒙, 尹朝辉, 阳范文, 等. 聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(8): 40-45.

Xu Mengmeng, Yin Zhaohui, Yang Fanwen, et al. Properties of PLA/polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer blends[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8): 40-45.

sorption capacity of them is increased, which is characterized with higher in elongation at break and tear strength.

Keywords : polylactic acid ; polyoxyethylene-polyoxypropylene ether block copolymer ; blend ; plasticization ; mechanical property ; rheological property

聚乳酸使用可再生植物资源——淀粉为原料制备而成,是一种真正意义上的完全可降解的生物基降解材料^[1-3]。聚乳酸使用后能被自然界中微生物完全降解,最终生成二氧化碳和水,符合欧盟、美国及日本等对环保的高要求,是公认的一种环境友好材料。聚乳酸因其生物安全性好、可被生物组织吸收、物理力学性能优良等特性,也是生物医学领域应用广泛的一种医用高分子材料^[4-5]。目前,聚乳酸已经在医疗卫生、包装材料、一次性餐具、纤维、非织造物、服装和电子等领域得以广泛应用^[6-11]。

然而,聚乳酸硬而脆,其断裂伸长率一般为5%~7%,撕裂强度也很差。因此,如何提高聚乳酸的断裂伸长率,改善其撕裂性能是拓展其应用领域的关键。目前,聚乳酸改性大致有以下几种方法:加入无机材料、有机增塑剂或非降解塑胶材料共混。无机材料,如竹纤维、CaCO₃及中空玻璃微珠等^[12-13],有机增塑剂,如柠檬酸三丁酯、聚乙二醇、聚四亚甲基醚醇、聚甲基丙烯酸甲酯和异山梨醇二正己酸酯等^[14-17],塑胶材料有聚氨酯、硅橡胶、聚乙烯、聚丁二酸丁二酯等^[18-23]。然而,上述有机增塑剂与聚乳酸相容性不理想,存在容易析出、长时间存放变脆等问题^[24],而无机材料和非降解塑料的加入导致改性材料不能完全生物降解^[25]。

笔者选用可降解增塑剂聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物与聚乳酸进行共混,制备聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系,研究聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量对共混体系流变性能、力学性能、微观形态结构和热力学行为的影响,期望达到良好增塑效果的同时,保持其可完全降解和生物安全性,为研制断裂伸长率高、可降解、亲水性能优异的生物医用改性聚乳酸材料提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚乳酸:4060D,工业级,美国 Nature Work 公司;

聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物:HM-530,分子量为6000~8000,医用级,广州海珥玛植物油

脂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

转矩流变仪:RT0I-55/20型,广州市普同实验分析仪器有限公司;

热压成型机:BL-6170-A型,东莞宝轮精密检测仪器有限公司;

冲片机:CP-25型,上海化工机械四厂;

电子万能试验机:CMT40204(20KN)型,深圳市新三思材料检测有限公司;

熔体流动速率(MFR)测试仪:MTM1000型,深圳市新三思材料检测有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 214型,耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):MVE 0329591690型,复纳科学仪器(上海)有限公司。

1.3 共混体系的制备

将聚乳酸放置于60℃真空干燥箱内烘24h,然后按照表1配方称量,采用转矩流变仪在温度为150℃、转速为50r/min下熔融共混,混炼时间5min。

采用热压成型机将聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系在160℃热压制备1mm厚薄片,预热时间5min,热压时间1min,冷却时间2min。

表1 聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系配方 %

材料	样品编号					
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
聚乳酸	100	96	92	88	84	80
聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物	0	4	8	12	16	20
合计	100	100	100	100	100	100

1.4 性能测试

拉伸性能:试样放置24h后,利用冲片机制备标准拉伸样条,在电子万能试验机上按GB/T 1040.3-2006进行测试,拉伸速率为500mm/min。

撕裂强度:利用裤形法测试1mm厚薄片的撕裂强度,在电子万能试验机上按GB/T 1040.2-2006进行测试,拉伸速率为50mm/min。

MFR:按ISO 1133-2011进行测试,测试温度

160℃,载荷 2.16 kg。

DSC 分析:在氮气气氛中,以 10℃/min 的升温速率从 20℃升至 200℃,恒温 5 min 消除热历史后,以 10℃/min 的降温速率降至 20℃,然后再以 10℃/min 的升温速率升温至 200℃,记录 DSC 曲线。

微观形态结构:薄片在低温(-80℃)下冷冻 24 h,脆断后对断面镀金处理,然后采用 SEM 观察。

2 结果与讨论

2.1 共混体系的流变性能

(1) 平衡转矩。

不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的平衡转矩如图 1 所示。

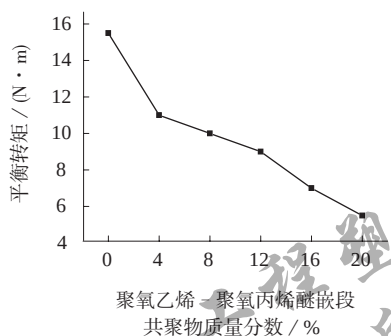


图 1 不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的平衡转矩

由图 1 可知,随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量的增加,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的平衡转矩呈下降趋势。当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数由 0% 增至 20% 时,共混体系的平衡转矩由 15.5 N·m 降到 5.5 N·m。这是由于聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物为增塑剂,与聚乳酸共混产生了较好的增塑效应,在剪切作用下分子链解缠结和滑移变得容易。聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物添加量越大,增塑效应越明显,流动阻力越小,故共混体系的平衡转矩不断降低。

(2) MFR。

不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的 MFR 如图 2 所示。由图 2 可知,随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的用量增加,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的 MFR 逐渐增大。当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段

共聚物的质量分数由 0% 增至 20% 时,共混体系的 MFR 由 1.6 g/(10 min) 提高到 15.6 g/(10 min),比未增塑时提高约 9 倍。当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数超过 12% 时,共混体系的 MFR 呈明显的上升趋势。聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的加入可改善材料的流动性,其用量越大流动性越好,该结果与平衡转矩分析结果一致。其原因为增塑剂聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的加入导致聚乳酸分子内部自由体积增加,链段活动能力增强,另外增塑剂渗入聚乳酸分子链之间,分子间距离增大,作用力减小,故共混体系的流动性得以改善。

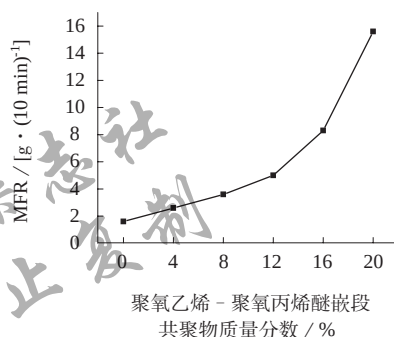


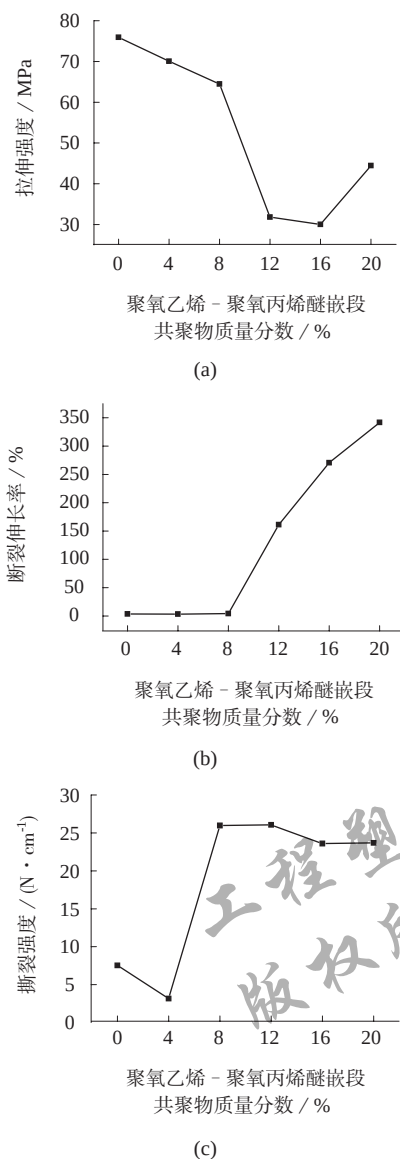
图 2 不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的 MFR

2.2 共混体系的力学性能

不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的力学性能如图 3 所示。

由图 3a 可以看出,加入聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物降低了聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的拉伸强度。当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数小于 16% 时,共混体系的拉伸强度随着其用量增加而降低;继续增加其质量分数达到 20% 时,拉伸强度又有所增大,为 44.5 MPa。产生上述现象的原因在于聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物渗入到聚乳酸分子链之间产生隔离效应,分子间距离增大,作用力减小,抵抗外力的能力降低,故拉伸强度随之降低;当其质量分数达到 20% 时,由于共混体系的断裂伸长率进一步提高,分子链发生取向产生的抵抗外力增强效应大于增塑产生的抵抗外力下降效应,故拉伸强度又有所提高。

由图 3b 可以看出,当加入聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数 ≤ 8% 时,共混体系的



a—拉伸强度; b—断裂伸长率; c—撕裂强度

图3 不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的力学性能

断裂伸长率基本保持不变,其原因在于添加量较少,对聚乳酸分子链的隔离效应较弱,分子滑移和解缠能力不足,故共混体系的断裂伸长率没有提高。当加入的质量分数 $> 8\%$ 时,断裂伸长率出现明显提高;添加质量分数为 12% 时,断裂伸长率为 161.28% ;当加入的质量分数为 20% 时,断裂伸长率为 341.86% ,比未加入时的断裂伸长率(3.43%)提高约 100 倍。原因在于当增塑剂聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物含量足够高时,其渗入聚乳酸分子链之间产生隔离效应明显,分子滑移和解缠能力大大增强,故断裂伸长率明显增加;增塑剂添加量越大,产生的滑移和解缠能力越强,断裂伸长率越

大。

纯聚乳酸的撕裂强度很差,极大地限制了其在包装领域的应用,如何提高撕裂强度一直是行业迫切需要解决的难题。由图3c可以看出,当聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数 $\leq 4\%$ 时,共混体系的撕裂强度比未添加时还小;当加入的质量分数为 8% 时,撕裂强度为 25.98 N/cm ;当加入的质量分数为 12% 时,撕裂强度为 26.02 N/cm ,比未增塑时的撕裂强度(7.55 N/cm)提高约 2.5 倍;进一步增加聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量,共混体系的撕裂强度略有下降。当加入的质量分数为 20% 时,撕裂强度为 23.7 N/cm 。撕裂强度同样与增塑效应存在对应关系,增塑剂渗入聚乳酸分子链产生足够的隔离效应时,分子滑移和解缠能力增强,达到一定程度后抵抗撕裂外力能力才会提高,故撕裂强度提高;当增塑剂用量进一步增加,分子滑移和解缠能力太强,抵抗撕裂外力反而会降低,故撕裂强度反而下降。

2.3 共混体系的热性能

不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的二次升温曲线如图4所示。

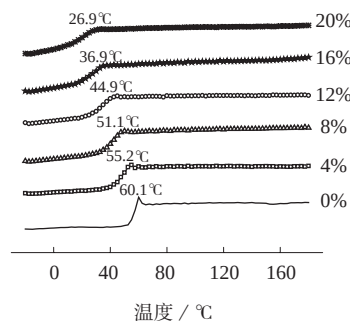


图4 不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的二次升温曲线

由图4可知,不同用量的聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物增塑聚乳酸前后的二次升温曲线都只出现一个峰,该峰对应材料的玻璃化转变温度(T_g),说明聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物与聚乳酸的相容性优异。

随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量增加,共混体系的 T_g 逐步下降,纯聚乳酸的 T_g 为 60.1°C ,添加质量分数 20% 的聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物时,共混体系的 T_g 为 26.9°C 。因为聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物渗入聚乳酸分子链间产生了良好的滑移和缠结效应,聚乳酸分子链段

活动能力增强,故 T_g 逐渐降低。此外,当添加聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物质量分数为 12% 时,共混体系的 T_g 为 44.9℃,相对于纯聚乳酸的 T_g 下降幅度达到 15℃ 以上,此时聚乳酸的链段活动能力明显增强,故共混体系的拉伸强度明显降低、断裂伸长率明显提高、撕裂强度大幅度改善。

2.4 共混体系的微观结构分析

不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下,聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系放大 1 万倍的微观结构 SEM 照片如图 5 所示。

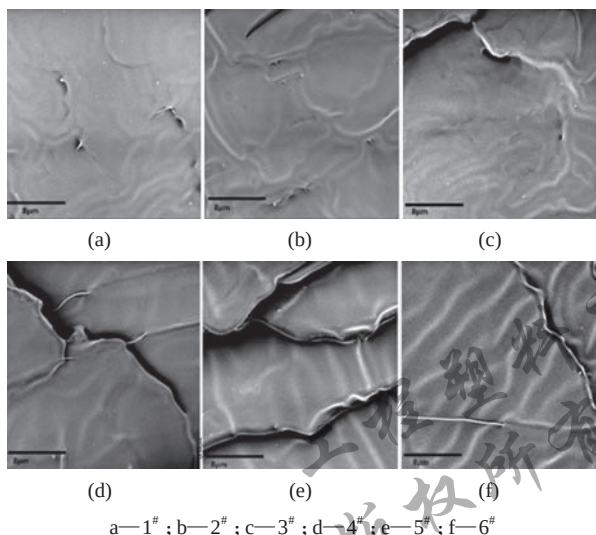


图 5 不同聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量下聚乳酸/聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物共混体系的 SEM 照片(放大 1 万倍)

从图 5 可以看出,共混体系断裂面均无明显孔洞和分散相,说明聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物与聚乳酸的相容性优异,故呈现均相结构。未增塑的聚乳酸断裂面平整,是一种典型的脆性断裂形态(见图 5a)。随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量增加,共混体系断面的褶皱、粗糙度和裂纹数量增加(见图 5b~图 5c);当其质量分数 $\geq 12\%$ 时,共混体系断面的褶皱、粗糙度和裂纹数量明显增加(见图 5d~图 5f),说明聚乳酸链段的滑移和解缠能力明显提高,并通过产生的褶皱和裂纹吸收大量能量,从而提高材料的柔韧性,表现为断裂伸长率和撕裂强度提高,这与断裂伸长率和撕裂强度的分析结果一致。

3 结论

(1) 加入聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物可降低共混体系的平衡扭矩,提高 MFR,改善加工性能。

(2) 聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物可改善聚乳酸的断裂伸长率和撕裂强度,当其质量分数为 20% 时,共混体系的断裂伸长率为 341.86%、拉伸强度为 44.5 MPa、撕裂强度为 23.7 N/cm,综合性能良好。

(3) 随着聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物用量增加,共混体系的 T_g 逐步降低,当添加质量分数 20% 的聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物时,共混体系的 T_g 从纯聚乳酸的 60.1℃ 降低到 26.9℃。

(4) SEM 分析发现,共体系的脆冷断面无孔洞和分散相,说明聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物与聚乳酸相容性优异,当添加聚氧乙烯-聚氧丙烯醚嵌段共聚物的质量分数 $\geq 12\%$ 时,共混体系的断面褶皱、粗糙度和裂纹数量明显增加,材料的柔韧性改善。

参考文献

- [1] 黄险波,王伟伟,曾祥斌.生物基降解塑料行业现状[J].生物产业技术,2017(6):86-91.
Huang Xianbo, Wang Weiwei, Zeng Xiangbin, et al. Status of bio-based degradable plastics industry[J]. Biotechnology & Business, 2017(6):86-91.
- [2] Kang Hailan, Li Yushi, Gong Ming, et al. An environmentally sustainable plasticizer toughened polylactide[J]. Rsc Advances, 2018, 8(21):11 643-11 651.
- [3] 肖玮,孙智慧,刘佳,等.生物降解食品包装材料的研究进展[J].食品工业,2018,39(1):216-218.
Xiao Wei, Sun Zhihui, Liu Jia, et al. Reviewed of biodegradable food packaging materials[J]. Food Industry, 2018, 39(1):216-218.
- [4] 阳范文,林永亮,田秀梅,等. PLA/PCL 共混物的制备及其在医用材料中的应用[J].工程塑料应用,2014,42(2):1-5.
Yang Fanwen, Lin Yongliang, Tian Xiumei, et al. Preparation of PLA/PCL blend and its application on medical materials[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):1-5.
- [5] 赵钰,沈兰萍,伍泓宇.聚乳酸纤维的研究进展及应用[J].合成纤维,2017,46(10):14-18.
Zhao Yu, Shen Lanping, Wu Hongyu. Development and applications of polylactic acid fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2017, 46(10):14-18.
- [6] 王亭亭,李梅,江伟,等.聚乳酸地膜在大棚西瓜种植中的应用研究[J].农业资源与环境学报,2017,34(6):536-542.
Wang Tingting, Li Mei, Jiang Wei, et al. Application of poly(lactic acid) mulching film in watermelon cultivation in greenhouse[J]. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2017, 34(6):536-542.
- [7] 颜景丹,张永刚,王国未,等.改性聚乳酸材料应用于汽车部件的

- 可行性分析及验证[J]. 汽车工艺与材料, 2017(10):65-68, 72.
- Yan Jingdan, Zhang Yonggang, Wang Guowei, et al. Feasibility analysis and verification of modified polylactic acid material used in automobile parts[J]. Automobile Technology and Materials, 2017(10):65-68, 72.
- [8] 张亮, 马锋. 医用可降解聚乳酸的化学修饰及其作为胆道支架的应用[J]. 合成化学, 2017, 25(10):832-835.
- Zhang Liang, Ma Feng. Chemical Modification of medical degradable polylactic acid and its application in biliary stent[J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2017, 25(10):832-835.
- [9] 吕培, 马丕明, 东为富, 等. 聚乳酸改性及其在包装材料中的应用[J]. 塑料包装, 2017, 27(3):24-33, 47.
- Lyu Pei, Ma Piming, Dong Weifu, et al. Polylactic acid modification and application in packaging materials[J]. Plastics Packaging, 2017, 27(3):24-33, 47.
- [10] 卢升帆. 聚乙二醇-聚乳酸载药胶束的制备及其在抗肿瘤药物传输中的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- Lu Shengfan. The preparation of polyethylene glycol-polylactic acid drug micelle and its application in antitumor drug delivery[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
- [11] 蒋峰, 崔海波. 聚乳酸在医疗器械领域的应用研究[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(21):60-62.
- Jiang Feng, Cui Haibo. Study on the application of polylactic acid in the field of medical devices[J]. Industry and Technology Forum, 2016, 15(21):60-62.
- [12] 刘淑琼, 刘瑞来, 王兆礼, 等. 不同增塑剂对 PLA/BF 复合材料的性能影响[J]. 塑料工业, 2018, 46(1):18-23.
- Liu Shuqiong, Liu Ruilai, Wang Zhaoli, et al. Effect of different plasticizers on properties of polylactide / bamboo fiber composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):18-23.
- [13] 李卫红, 包玉衡, 雷文, 等. 中药渣复合材料研究现状[J]. 塑料, 2017(5):81-83.
- Li Weihong, Bao Yuheng, Lei Wen, et al. Research on chinese medicine residues composite[J]. Plastics, 2017(5):81-83.
- [14] Koh J J, Zhang Xiwen, He Chaobin. Fully biodegradable Poly(lactic acid) / Starch blends: A review of toughening strategies[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109:99-113.
- [15] 徐蒙蒙, 阳范文, 王晗, 等. PLA / 增塑剂 / 碳纳米管三元共混体系的结构与性能[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(5):6-9, 18.
- Xu Mengmeng, Yang Fanwen, Wang Han, et al. Structure and properties of PLA / plasticizer / carbon nanotube three component blend system[J]. Synthetic Materials Aging & Application, 2017, 46(5):6-9, 18.
- [16] Mazidi M M, Berahman R, Edalat A. Phase morphology, fracture toughness and failure mechanisms in super-toughened PLA / PB-g-SAN / PMMA ternary blends: A quantitative analysis of crack resistance[J]. Polymer Testing, 2018, 67:380-391.
- [17] 杜中天, 赵岩, 白云刚, 等. 环保增塑剂异山梨醇二正己酸酯在聚乳酸中的应用[J]. 塑料科技, 2017, 45(9):60-63.
- Du Zhongtian, Zhao Yan, Bai Yungang, et al. Application of environmentally friendly plasticizer isosorbide n-hexanoic acid ester in PLA[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(9):60-63.
- [18] 阳范文, 张良, 谭铭浩, 等. PDLLA / PCL 共混医用材料的表面形貌和防粘连性能研究[J]. 功能材料, 2015, 46(15):15 095-15 098, 15 104.
- Yang Fanwen, Zhang Liang, Tan Minghao, et al. Study on surface morphology and anti-adhesion performance of PDLLA / PCL blend for medical use[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(15):15 095-15 098, 15 104.
- [19] Li Zibiao, Muiruri J K, Thitsartarn W, et al. Biodegradable silica rubber-core-shell nanoparticles and their stereo complex for efficient PLA toughening[J]. Composites Science and Technology, 2018, 159:11-17.
- [20] Cai Shenyang, Zeng Chao, Zhang Naiwen, et al. Enhanced mechanical properties of PLA / PLA-E blends via well dispersed and compatibilized nanostructures in the matrix[J]. Rsc Advances, 2018, 6(30):25 531-25 540.
- [21] Si Wanjie, Yang Li, Weng Yunxuan, et al. Poly(lactic acid) / bio-based polyurethane blends with balanced mechanical strength and toughness[J]. Polymer Testing, 2018, 69:9-15.
- [22] Lee J Y, Chin I J, Choi H J. Effect of particle size and crosslinking on the toughening of core-shell-type rubber-modified poly(lactic acid) composites[J]. Polymer Testing, 2018, 65:440-449.
- [23] 袁丽娟. 聚丁二酸丁二酯 / 聚乳酸共混材料的结构与性能[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- Yuang Lijuan. Structure and properties of poly(butylene succinate) / poly(lactic acid) blends[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [24] 徐蒙蒙, 尹朝辉, 阳范文, 等. 复合增塑剂改性 PLA 共混物的结构与性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(8):106-111.
- Xu Mengmeng, Yin Zhaohui, Yang Fanwen, et al. Structure and properties of PLA / plasticizer blends[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8):106-111.
- [25] 苏桂仙, 闫莉, 王奇峰, 等. PBS / 纳米 SiO₂ 改性聚乳酸[J]. 塑料, 2017(6):5-8.
- Su Guixian, Yan Li, Wang Qifeng, et al. Research on the modification of PLA / PBS / nano SiO₂[J]. Plastics, 2017(6):5-8.