



植物纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料研究动态

胡建鹏 邢东 郭明辉

Research Process and Prospect in Plant Fiber Reinforced Polylactide Acid Biodegradable Composites

Hu Jianpeng, Xing Dong, Guo Minghui

引用本文:

胡建鹏, 邢东, 郭明辉. 植物纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料研究动态[J]. 西南林业大学学报, 2020, 40(3):180–188. doi: 10.11929/j.swfu.201908032

Hu Jianpeng, Xing Dong, Guo Minghui. Research Process and Prospect in Plant Fiber Reinforced Polylactide Acid Biodegradable Composites[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2020, 40(3):180–188. doi: 10.11929/j.swfu.201908032

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201908032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

木纤维尺寸对聚乳酸结晶特性的影响

Effects of Wood Fibre Size on Crystallization Morphology of Poly Lactic Acid

西南林业大学学报. 2017, 37(2): 184 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.02.030>

单向纤维增强复合材料板I型裂纹尖端应力场的有限元分析

The Finite Element Analysis for Stress Field of Unidirectional Fibre-reinforced Composite Plate Mode I Crack Tip

西南林业大学学报. 2018, 38(3): 175 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.03.025>

纳米TiO₂制备PUF/TiO₂复合材料的性能研究

Effect of Nano TiO₂ on Properties of PUF/TiO₂ Composites

西南林业大学学报. 2018, 38(6): 182 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.06.024>

锌硼磷酸铵盐对木粉与聚氯乙烯复合材料燃烧性能的影响

Zinc Borophosphate Ammonium and Its Effects on the Burning Properties of Wood Flour/Polyvinyl Chloride Composites

西南林业大学学报. 2018, 38(3): 166 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.03.024>

基于柚木废弃物纳米纤丝化木质纤维素体系的高机械性能生物质材料构建

Fabrication of Biomass Materials with High Mechanical Properties Based on Teak Waste Nanofibrillated cellulose

西南林业大学学报. 优先发表 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201910051>

DOI: 10.11929/j.swfu.201908032

引文格式: 胡建鹏, 邢东, 郭明辉. 植物纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料研究动态 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(3): 180–188.

植物纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料研究动态

胡建鹏¹ 邢东¹ 郭明辉²

(1. 内蒙古农业大学材料科学与艺术设计学院, 内蒙古 呼和浩特 010000;

2. 东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 天然植物纤维具有价格低、来源广、比强度高、可再生、可生物降解的优良特性, 是绿色高分子材料聚乳酸理想的增强材料。从天然植物纤维类别角度出发, 归纳总结木、竹、麻类、农作物秸秆类、加工副产物类植物纤维特性, 系统概述各类植物纤维增强聚乳酸复合材料在界面改性、成型工艺、老化降解以及功能型材料研发等领域的研究现状, 针对现有研究中存在的问题, 展望天然植物纤维增强聚乳酸复合材料研究的发展趋势。

关键词: 植物纤维; 聚乳酸; 可生物降解; 复合材料

中图分类号: S784

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2020)03-0180-09

Research Process and Prospect in Plant Fiber Reinforced Poly lactide Acid Biodegradable Composites

Hu Jianpeng¹, Xing Dong¹, Guo Minghui²

(1. College of Material Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot Inner Mongolia 010000, China;

2. Material Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: The plant fiber is an ideal poly lactide acid (PLA) reinforcing component with the characteristics of low price, wide source, high specific strength, green renewable and biodegradable. In this paper, the characteristics of wood fibers, bamboo fibers, hemp fibers, crops straw fibers and fibers processing by-product are summarized from the category of plant fiber. And the research status of interface modification, molding process, aging degradation and functional material preparation of biodegradable composites by plant fiber reinforced PLA in recent years was comprehensively summarized. The development tendency of biodegradable composites by plant fiber reinforced PLA was proposed.

Key words: plant fiber; poly lactide acid; biodegradable; composites

可生物降解高分子材料是指在一定条件下能在微生物酶或光的作用下分解的材料^[1]。为了从根本上解决由石油资源枯竭造成的原料不足和废弃物所造成的环境问题, 此类材料已成为高分子材料领域中一个十分重要的发展方向。聚乳酸

(PLA) 因其来源于植物淀粉, 且在自然界中能够完全分解为 H₂O 和 CO₂, 被称为最具应用前景的绿色高分子材料, 多年来备受研究者的关注^[2]。由于聚乳酸自身价格昂贵、脆性大、耐热性差等弊端, 通常采用填料增强的方式对其进行改性处

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-10-09

基金项目: 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目 (NDYB2016-02) 资助; 国家自然科学基金项目 (31700484) 资助。

第1作者: 胡建鹏 (1987—), 男, 博士, 讲师。研究方向: 生物质复合材料。Email: jianpeng0101@126.com。

通信作者: 郭明辉 (1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 木质复合材料、木材科学。Email: gmh1964@126.com。

理制备聚乳酸复合材料^[3]。

天然植物纤维是自然界中储量最为丰富的天然高分子材料，具有比强度和比刚度高的显著特性^[4]，相较于人造纤维、高分子聚合物、矿物质等增强材料，植物纤维在原料成本、纤维特性以及可加工性等方面具有不可比拟的优势。采用植物纤维增强聚乳酸制备的复合材料可被称为“绿色复合材料”，其性能上不仅能够改善聚乳酸自身的弊端，同时能够赋予材料全生物降解特性，对于降低成本，节约资源具有重要意义。

可用于增强聚乳酸的植物纤维主要包括直接加工获取型的木材、竹材、麻纤维、农作物秸秆纤维，也包括蔗渣、椰壳纤维、香蕉纤维、茶粉和中药渣等加工副产物类植物纤维。目前，关于植物纤维增强聚乳酸复合材料研究概述的报道中，多是从纤维种类、界面改性方式、加工成型工艺、冲击性能改善、热性能改善等方面进行综述^[1-4]。然而，天然植物纤维种类繁多，各类植物纤维的特性也不尽相同，在制备植物纤维增强聚乳酸复合材料的研究中，植物纤维的类别往往决定着复合材料的改性方式、成型工艺的选择以及产品的综合性能。现有文献中尚未见从植物纤维类别角度出发的系统综述报道，特别是对麻类、农作物秸秆类以及加工副产物类植物纤维增强聚乳酸研究的系统综述。

1 木纤维增强聚乳酸复合材料

木材是自然界中来源广泛、储量丰富的植物纤维原料，以其优良的可加工性和良好的纤维特性成为增强聚合物的首选原料。目前的研究中多采用木粉和木纤维的物料状态对聚乳酸进行增强。研究主要集中在材料成型与特征因素分析、复合材料界面改性、功能型材料研发以及复合材料生物降解性能方面。

1.1 材料成型与特征工艺因素研究

袁媛等^[5]采用分层铺装—热压成型的工艺制备了聚乳酸木质基复合材料，获得最优工艺为质量分数为20%的聚乳酸用量，质量分数为3%的硅烷偶联剂A151用量，热压温度190℃，热压时间10 min，材料的静曲强度和弹性模量均达到室外型板材的物理力学指标，但耐水性指标较低。胡建鹏等^[6]采用热压法制备了木纤维/木质素磺酸铵/聚乳酸复合材料，通过响应面优化设计（RSM）获得材料最佳成型工艺，产品的主要理化指标满足潮湿状态下使用的普通型中密度纤维

板性能要求。吴文迪等^[7]研究了熔融共混工艺制备的聚乳酸/木粉复合材料结晶行为的变化规律，发现木粉充当了复合材料的成核剂，材料的非等温结晶能力增加，聚乳酸结晶速率加快。刘一楠等^[8]研究发现中等尺寸木纤维（直径0.012~0.050 mm，长度0.3~4.0 mm）能够有效增加聚乳酸的结晶度和结晶速率。吴蕴忱等^[9]研究了纤维长径比（19.16、38.7、41.54）对木纤维/聚乳酸复合材料力学性能的影响，结果发现添加中等尺寸木纤维的复合材料综合物理力学性能较高。潘宇峰等^[10]研究发现，木纤维的加入在一定程度上改变了木纤维/聚乳酸复合体系中PLA的结晶形态、结晶度和结晶方向，较高含量的木纤维对材料的弯曲强度和拉伸强度有提升作用。

1.2 界面改性研究

秦志永^[11]研究发现，添加偶联剂和硬脂酸复合改性的纳米CaCO₃对木纤维/聚乳酸复合材料的力学性能提升最大，拉伸强度和冲击强度分别较未处理前提高了13%和10%。杨龙^[12]对比研究了甘油、乙二醇和聚乙二醇400对木粉/聚乳酸复合材料界面相容性的改善效果，发现甘油对木粉和聚乳酸的界面相容性改善效果最好，其用量为6%时，材料的力学性能和热稳定性最优。刘如^[13]研究发现原位合成有机蒙脱土（OMMT）改性能够显著提高木粉/聚乳酸复合材料的耐水、力学和热稳定性。Hu等^[14]研究了氧化改性木质素磺酸铵（AL）对热压成型木纤维/聚乳酸复合材料的力学及尺寸稳定性的影响，研究发现，AL能够显著提升复合材料的弯曲强度、弹性模量及内结合强度，但增加了复合材料的吸水率、吸水厚度膨胀率以及表面水接触角。宋庆龙等^[15]对比研究了碱处理、乙酰化处理、超支化聚酯（HBPE）接枝处理和硅烷偶联剂KH570处理对木纤维/聚乳酸复合材料力学性能、热性能及界面结合性能的影响，KH570处理效果最好，材料具有较好的综合性能。杜军等^[16]研究了增容剂马来酸酐/甲基丙烯酸缩水甘油酯共接聚乳酸对木粉/聚乳酸复合材料界面相容性和力学性能的影响，研究发现，增容剂能够明显改善材料的界面相容性，复合材料的拉伸强度和冲击强度较对照组分别提高9.54%和7.23%，材料的平衡扭矩、剪切热、储能模量和复合粘度均有所提高。

1.3 生物降解性能研究

目前，国内外对于木纤维增强聚乳酸复合材料生物降解性能的研究还较少。郭文静等^[17]研究

了木纤维/聚乳酸复合材料使用耐久性与生物降解性能,发现在室内自然状态下放置24个月后,材料的弯曲强度和弯曲模量可保留90%以上;土埋6个月后,材料发生明显降解,弯曲强度和弯曲模量也随之下降。Lv等^[18]研究了淀粉/木粉/聚乳酸复合材料在户外的土埋降解特性,结果表明,淀粉的添加能够促进木粉/聚乳酸复合材料的降解速率,复合材料力学性能的衰减与降解时间的关系符合一阶指数衰变模型,且模型的拟合度高于0.99,能够较好的预测复合材料的耐久性。

1.4 功能型材料研发

王友勇^[19]通过超临界CO₂处理,采用“高温保压、低温发泡”工艺制备了较理想的微孔发泡木粉/聚乳酸复合材料,研究发现木粉对提高复合材料的泡孔密度和尺寸分布均匀性、减小泡孔尺寸具有积极作用,但对于该微孔发泡材料的实际应用性能还未开展研究。Agrilmis等^[20]采用熔融挤出工艺制备了可用于3D打印原料的木粉/聚乳酸复合材料,研究发现,随着木粉含量的增加,材料表面粗糙度和亲水性显著增大,当木粉含量高于30%时,复合材料的表面水接触角小于90°。Josef等^[21]对比研究了注塑成型与3D打印成型制备的木材/聚乳酸复合材料的吸水性与力学性能,结果表明,吸水后两种材料的拉伸强度均有所降低,但注塑成型材料的切口冲击强度高于3D打印成型材料。

2 竹纤维增强聚乳酸复合材料

竹材具有优异的纤维力学特性,是替代木材资源的首要选择,但其生长习性以及加工制造方面存在的弊端在一定程度上制约了竹材的广泛利用。现有研究中多采用竹粉和竹纤维的物料状态对聚乳酸进行增强,材料成型方面多沿用木纤维/聚乳酸复合材料的成型工艺,重点主要集中在复合材料界面改性的研究。随着纳米技术的不断进步,纳米竹纤维也逐渐应用到增强聚乳酸的研究中。

2.1 材料成型与界面改性研究

李新功等^[22]采用注塑成型工艺制备了竹纤维/聚乳酸复合材料,研究发现氢氧化钠(NaOH)溶液、异氰酸酯(MDI)以及NaOH+MDI联合处理3种方式均能改善材料界面粘结性和力学性能,其中联合处理方式效果最好。Ma等^[23]采用溶液铸膜法制备了竹纤维素纳米晶须/聚乳酸复合薄膜,重点研究了4种硅烷偶联剂对复合膜力学性能的影响,研究发现,经偶联剂处理后,复合

膜的拉伸强度与拉伸模量有所下降,但最大断裂伸长率显著提高。龚新怀等^[24]采用熔融共混工艺制备了竹粉/聚乳酸复合材料,研究发现乙酰柠檬酸丁酯(ATBC)增塑剂的添加能够改善竹粉/聚乳酸复合材料的加工流变性,添加质量分数为15%的增塑剂时,材料断裂伸长率提高339.5%。Kumar等^[25]采用电子束辐照预处理竹粉,以环氧硅烷为相容剂与聚乳酸复合制备竹粉/聚乳酸复合材料,研究发现,电子束辐照预处理能够使竹粉表面产生自由基,进一步提高了材料的界面相容性,材料的机械与热力学性能均有所提高。张欢欢^[26]制备了聚乳酸—竹颗粒—超微竹炭(PLA/BP/UFBC)三元复合材料,当竹颗粒与聚乳酸质量比为3:7时,材料具有较好的拉伸、弯曲和抗冲击性能;增塑剂PEG添加量为质量分数6%~10%时,材料力学强度明显提高,结晶行为变化显著。此外,研究者还先后研究了聚己内酯^[27]、壳聚糖^[28]对竹纤维/聚乳酸复合材料界面相容性、热性能、力学性能以及吸水性等性能的影响。

2.2 生物降解性能研究

王春红等^[29]采用非织造结合模压成型工艺制备了竹原纤维/聚乳酸复合材料,研究发现当竹原纤维体积分数为50%时,材料降解速率随时间延长而升高,且纤维含量高,降解速率快。郑霞等^[30]研究发现,在竹纤维/聚乳酸复合材料土埋降解过程中,竹纤维首先降解,PLA逐步分层缓慢降解;12个月后,材料质量损失率达到8.87%,PLA重均分子量降低25.9%,材料的冲击强度和拉伸强度分别降低了44.0%和43.8%。

2.3 功能型复合材料研发

凌启飞^[31]研究表明,采用聚磷酸铵(APP)+氢氧化铝(ATH)复配阻燃剂能够大幅度提升竹纤维/聚乳酸复合材料的热稳定性和残炭率,具有显著的抑烟效果,APP和ATH的最优复配质量比为14:6。董倩倩等^[32]采用熔融挤出拉丝成型工艺制备了可用于3D打印线材的竹纤维增强聚乳酸复合材料,当竹纤维以质量分数20%为用量时,材料的拉伸强度达到65.46MPa,相对于纯PLA提高了11.77%。

3 麻纤维增强聚乳酸复合材料

麻纤维具有比强度高、耐摩擦、耐腐蚀等特性,是较理想的聚合物增强体。可用于增强聚乳酸的麻纤维品种主要有剑麻(*Agave sisalana*)、亚麻(*Linum usitatissimum*)、苧麻(*Boehmeria*

nivea)、汉麻 (*Cannabis sativa*)、红麻 (*Hibiscus cannabinus*) 和黄麻 (*Corchorus capsularis*) 等。

3.1 剑麻纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于剑麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性、成型工艺、材料降解性能以及阻燃型材料等方面。吴文迪等^[33]分别采用蒸馏水、NaOH 溶液、马来酸酐 (MAH) 接枝和月桂酸 (GML) 接枝对剑麻纤维进行表面改性后与聚乳酸复合, 发现表面改性处理方式能够改善材料的界面相容性, 材料的冲击强度和拉伸强度明显提高。Mazzanti 等^[34]研究了剑麻纤维增强聚乳酸复合的增韧机制, 结果表明, 在相同麻纤维添加量的情况下, NaOH 溶液处理麻纤维制造的复合材料较未处理麻纤维复合材料具有较高的力学性能, 原因是因为 NaOH 溶液处理麻纤维在聚乳酸基质中分散性更好, 能够有效传递荷载。段俊鹏等^[35]制备了取向长剑麻纤维增强聚乳酸层压复合材料, 当纤维质量分数为 40% 时, 材料的力学性能最好, 其拉伸强度、弯曲强度以及冲击强度较纯 PLA 分别提高了 1.90、1.29 以及 15.69 倍。庞锦英等^[36]研究发现, 阻燃剑麻纤维增强聚乳酸复合材料随着土埋时间的延长, 表面形貌发生明显变化, 力学性能也随之下降, 极限氧指数从对照组的 31.8% 提高到 33.7%, UL-94 达到 V-0 级。

3.2 亚麻纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于亚麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在创新成型工艺、界面改性等方面。张文娜等^[37]从纺织成型的角度, 采用模压成型工艺制备了亚麻纤维/聚乳酸复合材料, 当铺层角度为 90° 时, 材料横向拉伸、弯曲强度分别达到最大 17.8 MPa 和 21.0 MPa; 铺层角度为 0° 时, 材料纵向拉伸、弯曲强度和模量最高。明瑞豪等^[38]研究发现亚麻纤维的加入促使复合材料中立构聚乳酸 (sc-PLA) 晶体生成率大幅提升, 加入 10% 亚麻的复合材料力学性能明显改善, 维卡软化温度达到 155.6 °C, 较对照组提高了 92 °C。李玉增等^[39]研究发现加入 1% 质量分数的偶联剂六亚甲基二异氰酸酯 (HMDI) 可提高亚麻/立构聚乳酸复合材料的拉伸强度、初始降解温度和动态储能模量。

3.3 苧麻纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于苧麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在创新成型工艺、界面改性、降解性能以及阻燃型复合材料等方面。周楠婷^[40]采用层压工艺制备了三维正交机织苧麻/聚乳酸复合材料, 在实验范围内, 复合材料经纬方向的最大拉

伸强度分别为 43.3 MPa 和 91.9 MPa; 纬向的冲击载荷最大值到达了 134.3 N, 冲击能量为 0.59 J; 此类材料能够有效吸收 1 000 ~ 2 500 Hz 的声波。竺露萍^[41]利用水和 NaOH 溶液对苧麻纤维进行表面处理, 采用模压方式制备了苧麻/聚乳酸复合材料, 经过表面处理后, 苧麻单根纤维拉伸强度显著增强; 水处理和 5%NaOH 溶液处理后的材料界面剪切力均显著增强。温变英等^[42]研究发现, 在碱性 (pH=12.0) 环境中, 苧麻纤维增强聚乳酸复合材料的降解速率比酸性和中性环境中更快。彭程蔚等^[43]研究发现阻燃剂 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物 (DOPO) 的添加能够提高苧麻/聚乳酸非织造纤维板材料的阻燃性能, 但阻燃剂添加过量时, 材料力学性能有所下降。

3.4 汉麻纤维增强聚乳酸复合材料

汉麻又称大麻, 对于汉麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在工艺优化、界面改性、降解性能以及发泡复合材料等方面。梁晓斌^[44]分别采用密炼—热压工艺和双向层压工艺制备了聚乳酸/汉麻复合材料, 优化获得最佳密炼工艺、热压成型工艺以及双向层压法成型工艺; 降解实验结果表明, 在自然降解过程中材料能够较长时间保持力学性质, 而土埋降解速率最高。王玉等^[45]研究了汉麻纤维/聚乳酸复合材料的流变性能, 当汉麻纤维长度一定时, 平衡扭矩、扭矩平衡时间随着纤维含量的增加而增大; 当纤维含量一定时, 最大扭矩、平衡扭矩、扭矩平衡时间随着纤维长度的增加而增大。潘丽爱等^[46]研究发现 NaOH 溶液和硅烷偶联剂 KH550 表面改性处理能够提高复合材料的弯曲性能、韧性、聚乳酸的结晶度以及初始热分解温度。陈美玉等^[47]研究表明大麻/聚乳酸复合发泡材料的弹性模量、屈服应力与纤维长度的指数函数的平方呈正相关, 与纤维添加量的平方呈正相关; 材料的拉伸断裂强度与纤维长度、纤维添加量均呈指数正相关。

3.5 黄麻纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于黄麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在创新成型工艺、界面改性、降解性能以及阻燃型复合材料等方面。袁利华等^[48]研究发现当采用 PLA/黄麻/PLA 铺层设计, 聚乳酸和黄麻纤维质量比为 6 : 4、黄麻纤维铺向角 45° 时, 材料的力学性能最优。徐晓倩等^[49]研究发现 NaOH 溶液 /硅烷偶联剂 KH550 联合处理能够更好的改善黄麻与聚乳酸界面粘结性, 与对照组相比, 材料拉伸强度和弯曲强度分别提高了 38% 和

35.5%。张瑜等^[50]研究发现在土壤中降解 240 d 和在缓冲溶液中降解 25 d, PLA/黄麻复合材料结构形态破坏严重, 拉伸强度大幅度降低。于涛等^[51]研究发现黄麻纤维的加入使阻燃型黄麻纤维/聚乳酸复合材料的力学性能和耐热性明显提高, 极限氧指数达到 35.6%, UL-94 达到 V-0 级。

3.6 红麻纤维增强聚乳酸复合材料

红麻又称洋麻, 目前, 对于红麻纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在功能型复合材料研制以及材料降解性能等方面。周露等^[52]采用注塑成型工艺制备了阻燃型红麻/聚乳酸复合材料, 经 NaOH 溶液和硅烷偶联剂表面改性的红麻纤维能够提升材料的力学性能, 阻燃剂 PX-220 添加量为 20% 时, 材料的极限氧指数达到 33.5%, UL-94 达到 V-0 级。Hidayat 等^[53]采用海藻酸钙固定化平菇菌丝对红麻/聚乳酸复合材料进行降解实验, 经过 6 个月的降解, 材料的质量损失率达到 48%, 力学强度下降的同时伴有颜色的改变, 固定化平菇菌能够同时降解红麻纤维和聚乳酸。Chin 等^[54]研究发现纤维原料的含量对红麻/聚乳酸吸声材料的吸声系数具有重要影响, 材料的孔隙率随着红麻纤维含量的增加而增加, 但在一定程度上会降低材料的拉伸强度。

4 农作物秸秆纤维增强聚乳酸复合材料

农作物秸秆资源丰富、价格低廉、生长周期短, 内含丰富的纤维素。我国大部分农作物秸秆资源仅被用作动物饲料或焚烧处理, 既污染了环境, 又造成极大的资源浪费。目前用于聚乳酸树脂增强体的农作物秸秆主要有玉米秸秆、麦秸秆和棉秆等。

4.1 玉米秸秆纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于玉米秸秆纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性、材料降解性能、功能型复合材料以及微晶纤维素增强聚乳酸复合材料等方面。张克宏等^[55]采用溶液浇铸模压工艺制备了 PLA/玉米秸秆粉复合材料, 当玉米秸秆粉质量分数为 20% 时, 材料性能最优; 钛酸酯质量分数为 3% 时, 材料具有良好的力学性能、热稳定性以及较低的吸水性, 且作用效果优于硅烷偶联剂 KH550。丁芳芳^[56]研究发现纤维用量为 10%~13% 时, 玉米秸秆纤维/聚乳酸复合材料具有较好的断裂伸长率和拉伸强度, 土壤液降解 120 d 后, 材料的降解率随着纤维含量的增加而增大。赵心一等^[57]制造出了具有吸声特性的玉米皮纤维/

聚乳酸复合材料, 当采用 2 mm 厚的穿缝板、穿缝率 7%、添加 1 层 3 mm 的麻毡及留有 2 层共 1 cm 空气层时, 材料具有良好的吸声性能。王瑜等^[58]研究发现秸秆纤维的加入改变了聚乳酸/玉米秸秆纤维复合材料内部泡孔成型方式, 提高了发泡材料的表观密度和力学性能, 当纤维质量分数为 15% 时, 发泡材料表观密度最小为 0.568 g/cm³, 拉伸强度最大达到 8.031 MPa。李春光等^[59]研究发现当玉米秸秆微晶纤维素 (CSCMC) 质量分数为 10% 时, 玉米秸秆微晶纤维素/聚乳酸复合膜的起始分解温度提高了 34.38 °C, 拉伸强度提高了 58.3%, 断裂伸长率提高了 31.1%。

4.2 麦秸秆纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于麦秸秆纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性、材料降解性能、耐水性能以及功能型复合材料等方面。张建等^[60]对比研究了麦秸秆、稻秸秆和稻壳增强聚乳酸复合材料的性能, 发现稻秸秆的纤维素和半纤维素总量最高, 材料力学性能最高, 吸水率最小。王哲等^[61]研究发现硅烷偶联剂 KH550 能够改善麦秸秆纤维/聚乳酸复合材料的界面相容性, 提高力学性能, 降低吸水性。潘刚伟等^[62]研究发现在弱碱性 PBS 缓冲溶液中, 聚乳酸/麦秸秆纤维复合材料的吸水率和质量损失率随时间延长而增大, 拉伸强度和杨氏模量下降明显。姜洪丽等^[63]采用热压成型工艺制备了阻燃型聚乳酸/麦秸秆复合材料, 当阻燃剂聚磷酸铵 (APP) 添加量为 20% 时, 材料的极限氧指数提高了 33%, 成炭率提高了 330%, UL-94 达到 V-0 级。

4.3 棉秆纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于棉秆纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性、功能型复合材料以及降解性能等方面。吴峥^[64]采用热压法制备了脱胶棉秆纤维/聚乳酸阻燃复合材料, 获得了优化工艺参数, 产品具有较好的力学强度及阻燃特性, 材料的物化值为 1.28 mg (<2 mg), 满足汽车内饰材料雾化性能。王博^[65]在上述研究基础上, 采用添加复配硅烷偶联剂和物理协效剂 (蒙脱土和微纤化纤维) 的方式进一步增强汽车用内饰板的性能, 当添加质量分数为 3% 的质量比为 1:1 复配硅烷偶联剂 (KH550+A171) 以及质量分数为 3% 的微纤化纤维时, 材料的力学性能大幅提高。康玉萍^[66]对比研究了棉秆纤维/聚乳酸复合地膜与普通 PE 地膜性能的差异, 发现复合地膜具有较优的拉伸强力 (190.80 N)、顶破强力

(11.14 N) 以及良好的土壤降解特性, 同时透光率 (62.12%)、地膜厚度 (0.34 mm)、增温效果 (2.6 °C) 和保墒性 (7.7%) 满足使用要求。

5 加工副产物类植物纤维增强聚乳酸复合材料

加工副产物类植物纤维来源于植物生产、加工和利用过程中的剩余物, 主要包括蔗渣纤维、椰壳纤维、香蕉纤维、茶粉、核桃粉和中药渣等。与木、竹、麻、秸秆等直接加工获取型植物纤维相比, 加工副产物类植物纤维来源广泛、价格低廉, 具有显著的区域优势, 是较理想的聚乳酸增强体原料。

5.1 蔗渣纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于蔗渣纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在成型工艺优化、界面改性、材料热稳定性以及微晶纤维素复合膜等方面。冯彦洪等^[67]以蒸汽爆破手段预处理甘蔗渣纤维制备了 PLA/蔗渣纤维复合材料, 研究发现蒸汽爆破预处理使得材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度较对照组分别提高了 53.62%、11.19% 和 5.21%。符彬等^[68]研究表明在纤维质量分数为 30%、NaOH 溶液质量分数 5%、热压温度 170 °C 的最优工艺条件下, PLA/蔗渣纤维复合材料拉伸强度和冲击强度值分别达到 44.6 MPa 和 10.5 MJ/m²。洪浩群等^[69]研究发现硅烷偶联剂可以改善甘蔗渣与 PLA 的界面相容性, 有助于提高材料的热稳定性。Kamthai 等^[70]采用蔗渣羧甲基纤维素 (CMCB) 与聚乳酸复合制备复合膜, 发现 CMCB 的加入能够显著降低复合膜的玻璃化转变和熔融温度, 同时提升复合膜在高温条件下的储能模量, 但随着 CMCB 添加量的增加, 室温下复合膜的拉伸强度和断裂伸长率并未发生显著变化。

5.2 椰壳纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于椰壳纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性和阻燃材料等方面。张莉等^[71]将水洗椰壳纤维 (WCF) 和碱洗椰壳纤维 (ACF) 与 PLA 熔融共混制备复合材料, 与纯 PLA 相比, 材料的拉伸强度和玻璃化转变温度降低, 冲击强度和储能模量增大; 当 ACF 质量分数为 3% 时, 材料的冲击强度较纯 PLA 提升了 24%。杨舒宇等^[72]研究发现环氧包覆型聚磷酸铵 (EAPP) 与椰壳纤维具有良好的协同阻燃作用, 当椰壳纤维添加量 10%、EAPP 添加量 20% 时, 阻燃型椰壳纤维/PLA 复合材料的烧失量 (LOI)

可达 34.6%, UL-94 达到 V-0 级。

5.3 香蕉纤维增强聚乳酸复合材料

目前, 对于香蕉纤维增强聚乳酸复合材料研究主要集中在界面改性、老化降解性能以及阻燃材料等的研究。庞锦英等^[73]制备了阻燃型香蕉纤维/PLA 复合材料, 发现添加经 KH-550 偶联剂处理的香蕉纤维的材料力学性能最好; 材料的综合性能在阻燃剂 IFR 用量为 5% 时达到最佳, 极限氧指数达到了 32.8%, UL-94 达到 V-0 级。庞锦英等^[74]还发现, 当老化 12 d 后, 材料的拉伸强度和弯曲强度分别降低了 90.7% 和 74.4%; 燃烧性能也逐渐降低。Shih 等^[75]采用硅烷偶联剂和 NaOH 溶液改性处理香蕉纤维, 研究发现当改性纤维质量分数为 40% 时, 材料的拉伸强度和弯曲强度分别提高 78.6 MPa 和 65.4 MPa, 但材料的抗冲击性能有所下降; 与此同时, 材料中 PLA 的热变形温度 (HDT) 从 62 °C 提升到 139 °C, 热稳定性显著提高。

5.4 其他加工副产物类植物纤维

除上述 3 种加工副产物类植物纤维外, 茶粉、核桃壳粉以及中药渣等加工副产物类植物纤维也逐渐被应用到增强聚乳酸的研究中。主要研究集中在界面改性、材料力学性能及热稳定性等方面。

在茶粉应用方面, 龚新怀等^[76]研究发现当偶联剂二苯基甲烷二异氰酸酯 (MDI) 添加量为 2% 时, 茶粉/PLA 复合材料的拉伸强度、弯曲强度及缺口冲击强度较对照组分别提高了 18.9%、17.6% 和 7.2%, 拉伸模量和弯曲模量分别提高了 12.6% 和 30.6%。此外, 龚新怀等^[77]还发现增容剂甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝聚乳酸 (GMA-g-PLA) 的添加能明显改善茶粉与 PLA 的界面相容性, 材料的力学性能和热稳定性提高, 吸水率降低。

在核桃壳粉应用方面, 刘继云等^[78]研究表明当硅烷偶联剂 KH550 添加量为质量分数为 6% 时, 核桃壳粉/聚乳酸复合材料的拉伸、弯曲和冲击强度较未处理的材料分别提高了 19.1%、20.6% 和 19.8%; 填料量为质量分数为 6% 时, 材料的热降解活化能 (E_a) 较 PLA 降低了 29.8 kJ/mol。张红娟等^[79]分别采用钛酸酯、硅烷偶联剂 KH550、十八胺以及 NaOH 溶液处理方式进行界面改性, 研究发现当核桃壳粉质量分数为 1% 时, 核桃壳粉/PLA 复合材料的断裂伸长率和拉伸强度较纯 PLA 分别提高了 18.15% 和 6.60%; 经表面表面处理后制备的复合材料的熔体流动速率 (MFR) 均有所增大。

在中药渣应用方面,包玉衡^[80]对比研究了中药渣/PLA复合材料与木粉/PLA复合材料性能的差异性,在相同工艺下,中药渣/PLA复合材料的拉伸强度方面略有提升;使用增塑剂DOP能够改善熔融流动性能;当中药渣质量分数为40%时,材料经土埋降解120d后,失重率达到16.0%,拉伸与弯曲强度分别降低到6.89 MPa和26.78 MPa。Feng等^[81]分别对山芝麻(*Helictercs angustifolia*)、三叉苦(*Evodia leptota*)、广藿香(*Pogostemon cablin*)3种中药渣进行机械粉碎和蒸汽爆破处理后与聚乳酸复合,研究发现,中药渣中木质化程度高、半纤维素等杂质少的复合材料力学性能较好;蒸汽爆破较机械粉碎处理方式制备的复合材料的拉伸性能优异但弯曲性能较差。

6 展望

综上所述,植物纤维增强聚乳酸复合材料的研发已取得了快速发展,研究和应用取得了长足的进步,在航空、地铁、汽车内饰材料、室内、户外装修装饰材料等领域已有应用,展现出良好的应用前景。可以看到,近5年来麻纤维、农作物秸秆纤维以及加工副产物类植物纤维增强聚乳酸复合材料的研究发展迅速,但仍存在一些问题亟待关注与解决,如麻纤维获取过程中的脱胶处理工艺、秸秆纤维表面蜡质层对界面相容性的影响,加工副产物类植物纤维利用范围较窄、区域性植物纤维资源得不到合理利用、新型植物纤维增强聚乳酸复合材料成型理论不够完善、复合材料生物降解机理不明确等等。

建议今后在以下方面继续开展深入探索和研究。第1拓宽植物纤维原料利用范围,发挥植物纤维性能优势,衍生出性能多样的复合材料;第2在明确植物纤维特性基础上,深入挖掘具有针对性和协效性的界面改性方法;第3打破传统制造模式,创新材料加工成型方式,系统建立复合材料成型理论;第4研发功能型复合材料,满足各类工程应用的需求,提升复合材料的附加值;第5明确复合材料老化与生物降解机理,建立完善材料性能衰减机制,为植物纤维增强聚乳酸复合材料进一步开发利用奠定基础。

【参 考 文 献】

[1] 宋亚男,陈绍状,侯丽华,等.植物纤维增强聚乳酸可降解复合材料的研究[J].高分子通报,2011(9):

111-120.
 [2] 张扬,张静,江雯钊,等.聚乳酸/植物纤维全生物降解复合材料的研究进展[J].中国塑料,2015,29(8):25-31.
 [3] 姚姗姗,蒋迪,郑翔,等.植物纤维改性聚乳酸的研究进展[J].塑料科技,2017,45(4):118-122.
 [4] 张燕,李守海,黄坤,等.可降解聚乳酸/天然植物纤维复合材料的研究进展[J].工程塑料应用,2012,40(5):102-106.
 [5] 袁媛,郭明辉,王勇,等.聚乳酸木质基材料的制造工艺[J].东北林业大学学报,2010,38(9):81-83.
 [6] 胡建鹏,郭明辉.木纤维—木质素磺酸铵—聚乳酸复合材料的工艺优化与可靠性分析[J].北京林业大学学报,2015,37(1):115-121.
 [7] 吴文迪,张振,吴广峰,等.木粉成核剂对聚乳酸/木粉复合材料性能的影响[J].塑料工业,2016,44(5):101-104.
 [8] 刘一楠,刘珊杉,郭文静.木纤维尺寸对聚乳酸结晶特性的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(2):184-191.
 [9] 吴蕴忱,刘珊杉,刘巍岩.木纤维尺寸对聚乳酸木纤维复合材料性能的影响[J].林业科技,2017,42(4):23-26.
 [10] 潘宇峰,刘欣,刘珊杉,等.木纤维含量对注塑成型木纤维/聚乳酸复合材料性能的影响[J].林业科技,2018,43(4):47-49.
 [11] 秦志永.木纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料的制备与性能表征[D].长沙:中南林业科技大学,2011.
 [12] 杨龙.木粉/聚乳酸复合材料的制备及性能表征[D].哈尔滨:东北林业大学,2015.
 [13] 刘如.有机蒙脱土改性木粉/聚乳酸复合材料的制备及性能[D].北京:北京林业大学,2015.
 [14] Hu J P, Guo M H. Influence of ammonium liginosulfonate on the mechanical and dimensional properties of wood fiber biocomposites reinforced with polylactic acid[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 78: 48-57.
 [15] 宋庆龙,温慧颖, Jesperde C C, 等.改性木纤维/聚乳酸复合材料的制备与性能研究[J].分子科学学报,2016,32(6):453-459.
 [16] 杜军,宋永明,张志军,等.MAH/GMA 共接枝聚乳酸对木粉/PLA复合材料性能的影响[J].材料工程,2017,45(12):30-36.
 [17] 郭文静,王正,鲍甫成,等.木纤维/聚乳酸生物质复合材料耐久性和生物降解性能[J].现代化工,2009,29(S2):117-119,121.
 [18] Lv S, Zhang Y H, Gu J Y, et al. Biodegradation behavior and modelling of soil burial effect on degradation rate of PLA blended with starch and wood flour[J].

- Colloids & Surfaces Biointerfaces, 2017(159): 800–808.
- [19] 王友勇. 微孔发泡聚乳酸/木粉复合材料的制备及泡孔结构调控 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [20] Ayrimis N, Kariž M, Kitek Kuzman M. Effect of wood flour content on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament [J]. International Journal of Polymer Analysis & Characterization, 2019, 24(7): 659–666.
- [21] Josef V E, Andreas H, Ivana B, et al. Mechanical properties and water absorption behaviour of PLA and PLA/wood composites prepared by 3D printing and injection moulding [J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(4): 672–678.
- [22] 李新功, 郑霞, 吴义强. 竹纤维/聚乳酸复合材料界面调控 [J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 94–98.
- [23] Ma Y R, Qian S P, Hu L, et al. Mechanical, thermal, and morphological properties of PLA biocomposites toughened with silylated bamboo cellulose nanowhiskers [J]. Polymer Composites, 2019, 40(8): 3012–3019.
- [24] 龚新怀, 戴忠豪, 赵升云, 等. 乙酰柠檬酸丁酯增韧竹粉/聚乳酸生物基复合材料的制备与性能 [J]. 高分子通报, 2017(11): 67–73.
- [25] Kumar A, Tumu V R. Physicochemical properties of the electron beam irradiated bamboo powder and its bio-composites with PLA [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 175: 107098.
- [26] 张欢欢. 聚乳酸/竹颗粒/超微竹炭复合材料制备及改性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [27] 乔建政, 纪雨辛, 王琦, 等. 聚己内酯/聚乳酸/竹纤维复合材料制备及性能 [J]. 中国塑料, 2016, 30(11): 25–31.
- [28] 刘淑琼, 王兆礼, 李冲. 壳聚糖对聚乳酸/竹纤维复合材料的性能影响 [J]. 塑料, 2017, 46(4): 39–42, 46.
- [29] 王春红, 王瑞, 沈路, 等. 竹原纤维增强聚乳酸完全可降解材料的性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2008, 36(1): 8–11.
- [30] 郑霞, 李新功, 吴义强, 等. 竹纤维/聚乳酸可生物降解复合材料自然降解性能 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 362–367.
- [31] 凌启飞. 阻燃抑烟型竹纤维/聚乳酸复合材料制备及性能研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [32] 董倩倩, 林溪顺, 屈阳, 等. 竹纤维增强聚乳酸 3D 打印材料机械性能研究: 2016 年全国高分子材料科学与工程研讨会论文摘要集 [C]. 桂林: 桂林理工大学, 2016.
- [33] 吴文迪, 李明哲, 张鼎武, 等. 剑麻纤维/聚乳酸复合材料的制备及性能研究 [J]. 塑料工业, 2016, 44(10): 18–21.
- [34] Mazzanti V, Pariente R, Bonanno A, et al. Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system [J]. Composites Science & Technology, 2019(180): 51–59.
- [35] 段俊鹏, 梁行, 兰碧, 等. 取向长剑麻纤维增强聚乳酸层压复合材料力学性能的研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45(3): 109–113.
- [36] 庞锦英, 刘钰馨, 李建鸣, 等. 阻燃剑麻纤维增强聚乳酸复合材料的自然降解性能研究 [J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2017, 34(2): 77–81, 96.
- [37] 张文娜, 李亚滨. 亚麻纤维增强聚乳酸复合材料的制备与性能表征 [J]. 纺织学报, 2009, 30(6): 49–53.
- [38] 明瑞豪, 杨革生, 李玉增, 等. 亚麻纤维/立构聚乳酸复合材料的制备与性能表征 [J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(5): 169–172, 177.
- [39] 李玉增, 杨革生, 明瑞豪, 等. 亚麻纤维增强立构聚乳酸复合材料的制备及界面改性 [J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(8): 109–114.
- [40] 周楠婷. 苧麻纤维增强聚乳酸复合材料的界面、结构改进及其力学性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [41] 竺露萍. 苧麻/聚乳酸复合材料的制备、性能优化及热水老化研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [42] 温变英, 李晓媛, 张扬. 苧麻纤维/聚乳酸复合材料在不同 pH 环境下的水解行为 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 54–60.
- [43] 彭程蔚, 陈颀, 李滋方, 等. 阻燃型聚乳酸/苧麻复合材料的制备及性能 [J]. 塑料, 2018, 47(3): 1–4, 8.
- [44] 梁晓斌. 汉麻/聚乳酸全降解复合材料的制备和性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [45] 王玉, 陈立成, 陈美玉, 等. 汉麻纤维/聚乳酸混炼流变性能的影响研究 [J]. 西安工程大学学报, 2010, 24(6): 718–721.
- [46] 潘丽爱, 白岚, 佟毅, 等. 表面改性汉麻纤维与聚乳酸复合材料的制备研究 [J]. 农业机械, 2011(35): 162–165.
- [47] 陈美玉, 来侃, 孙润军, 等. 大麻/聚乳酸复合发泡材料的力学性能 [J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 28–34.
- [48] 袁利华, 韩建, 徐国平. 可降解 PLA/黄麻新型复合材料的制备与力学性能 [J]. 浙江理工大学学报, 2007(1): 28–31.
- [49] 徐晓倩, 杨淳, 余木火, 等. 表面处理对可生物降解黄麻/PLA 复合材料结构和性能的影响 [J]. 塑料科技, 2010, 38(12): 35–38.
- [50] 张瑜, 张丽丽. PLA/黄麻复合材料降解性能的研究 [J]. 产业用纺织品, 2011, 29(5): 12–16.
- [51] 于涛, 李岩, 任杰. 阻燃级黄麻短纤维/聚乳酸复合材料的制备及性能研究 [J]. 材料工程, 2009, 37(S2): 294–297.

- [52] 周露,王新龙,王通文. 阻燃增强聚乳酸复合材料的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2015, 43(10): 55-57, 61.
- [53] Hidayat A, Tachibana S. Characterization of polylactic acid (PLA)/kenaf composite degradation by immobilized mycelia of *Pleurotus ostreatus* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012, 71: 50-54.
- [54] Chin D D V S, Yahya M N B, Che Din N B, et al. Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA) [J]. Applied Acoustics, 2018, 138: 179-187.
- [55] 张克宏,肖慧,张晓飞,等. 聚乳酸/玉米秸秆粉复合材料的制备与性能研究 [J]. 中国塑料, 2017, 31(11): 72-77.
- [56] 丁芳芳. 玉米秸秆纤维/聚乳酸复合材料的力学及降解性能研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 455-458.
- [57] 赵心一,吕丽华,魏春艳,等. 玉米皮纤维/聚乳酸吸声复合材料的制备与性能 [J]. 大连工业大学学报, 2015, 34(5): 366-369.
- [58] 王瑜,张萍,高德,等. 植物纤维含量对聚乳酸/玉米秸秆纤维发泡材料 (PFFM) 性能的影响研究 [J]. 化工新型材料, 2012, 40(6): 79-81, 87.
- [59] 李春光,徐鹏飞,李云霞,等. 玉米秸秆微晶纤维素/聚乳酸复合膜的制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2011, 28(4): 94-98.
- [60] 张建,何春霞,唐辉,等. 3种植物纤维填充聚乳酸复合材料性能对比 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(11): 12-17.
- [61] 王哲,张效林,徐冲,等. 聚乳酸/麦秸秆纤维复合材料力学及吸水性能研究 [J]. 中国塑料, 2018, 32(8): 46-51.
- [62] 潘刚伟,侯秀良,练滢,等. 聚乳酸/小麦秸秆纤维复合材料降解性能研究 [J]. 化工新型材料, 2013, 41(1): 149-151.
- [63] 姜洪丽,施成涛,王光照. 聚磷酸铵对聚乳酸/麦秸秆复合材料阻燃和力学性能的影响 [J]. 中国塑料, 2016, 30(7): 30-33.
- [64] 吴峥. 棉秆皮纤维/聚乳酸复合汽车内饰板的性能研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2013.
- [65] 王博. 改性棉秆皮/聚乳酸阻燃复合板材性能研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
- [66] 康玉萍. 棉秆皮纤维/聚乳酸纤维复合地膜的研制 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [67] 冯彦洪,沈寒知,瞿金平,等. PLA/蔗渣复合材料的制备及其性能的研究 [J]. 塑料工业, 2010, 38(1): 25-28.
- [68] 符彬,郑霞,潘亚鸽,等. 蔗渣纤维增强聚乳酸复合材料的制备及性能分析 [J]. 中国造纸学报, 2015, 30(3): 36-40.
- [69] 洪浩群,刘灏,张海燕. 甘蔗渣的改性方法对甘蔗渣/聚乳酸复合材料结构与性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(9): 2369-2378.
- [70] Kamthai S, Magaraphan R. Influence of bagasse carboxymethyl cellulose addition on the thermal and mechanical properties of PLA composites [J]. Advanced Materials Research, 2013, 747: 157-161.
- [71] 张莉,孙智慧,梁多平,等. 改性椰纤维增强聚乳酸复合材料力学性能 [J]. 包装工程, 2017, 38(7): 69-73.
- [72] 杨舒宇,徐鼎,庞素娟,等. PLA/椰壳纤维阻燃复合材料的制备与性能研究 [J]. 塑料科技, 2015, 43(1): 69-73.
- [73] 庞锦英,莫羨忠,刘钰馨. 阻燃香蕉纤维增强聚乳酸复合材料的制备与表征 [J]. 化工进展, 2015, 34(4): 1050-1054.
- [74] 庞锦英,莫羨忠,刘钰馨,等. 阻燃香蕉纤维增强聚乳酸复合材料的热老化性能研究 [J]. 化工新型材料, 2016, 44(3): 208-210.
- [75] Shih Y F, Huang C C. Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF) biodegradable green composites [J]. Journal of Polymer Research, 2011, 18(6): 2335-2340.
- [76] 龚新怀,辛梅华,李明春,等. MDI 增容茶粉/聚乳酸生物质复合材料的制备与性能 [J]. 塑料工业, 2016, 44(11): 127-131, 151.
- [77] 龚新怀,辛梅华,李明春,等. 增容剂改善茶粉/聚乳酸生物质复合材料性能 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 308-314.
- [78] 刘继云,杨学莉,刘莹莹,等. 表面改性核桃壳对聚乳酸/核桃壳粉体复合材料性能的影响 [J]. 中国塑料, 2014, 28(3): 40-45.
- [79] 张红娟,郑红娟,孙正谦. 表面处理剂对聚乳酸/核桃壳粉体复合材料性能的影响 [J]. 塑料科技, 2017, 45(6): 95-100.
- [80] 包玉衡. 中药渣/PLA 复合材料的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [81] Feng Y H, Li X L, Jin G, et al. Preparation and properties of several Chinese herbal residue/polylactic acid composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(2): 214-224.

(责任编辑 冯雪)

