复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 6 期 6 月 2021 年
Vol. 38 No. 6 Jun 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20200909.004

枣核/低密度聚乙烯复合材料的力学性能

卢文玉[1,2]，蔡红珍[1,2]，于文凡[1,2]，徐航[1,2]，韩祥生*[1,2]

（1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院，淄博 255000；2. 山东省清洁能源工程技术研究中心，淄博 255000）

分享本文

摘 要：为充分利用红枣精深加工产生的废弃物，以枣核 (JP) 和低密度聚乙烯 (LLDPE) 为主要材料，采用注塑成型法制备 JP/LLDPE 复合材料，并对其静态力学性能 (拉伸、弯曲和冲击) 和动态力学性能 (动态黏弹性、蠕变行为和应力松弛行为) 进行系统测试分析。静态力学性能分析表明，随 JP 含量的增加，JP/LLDPE 复合材料的拉伸强度和冲击强度逐渐降低，但复合材料的弯曲强度得到明显的提升。当 JP 添加量为 20wt% 时，JP/LLDPE 复合材料的弯曲强度最高，较纯 LLDPE 的弯曲强度提高 63.57%；动态力学分析表明，JP 含量的增加有利于提高 JP/LLDPE 复合材料的刚性、抗蠕变性能和抗应力松弛性能，而温度的升高会对 JP/LLDPE 复合材料的抗蠕变性能和抗应力松弛性能产生不利的影响。

关键词：枣核；低密度聚乙烯；复合材料；废弃物利用；力学性能

中图分类号：TB332；TS209 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2021)06-1775-09

Mechanical properties of jujube pit/linear low density polyethylene composites

LU Wenyu[1,2], CAI Hongzhen[1,2], YU Wenfan[1,2], XU Hang[1,2], HAN Xiangsheng*[1,2]

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. Shandong Research Center of Engineering and Technology for Clean Energy, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to make full use of the waste generated during the deep processing of red jujube, jujube pit (JP) and linear low density polyethylene (LLDPE) composites were prepared by injection molding method with JP and LLDPE as the main components. The static mechanical properties (tensile, flexural and impact) and dynamic mechanical properties (dynamic viscoelastic, creep behavior and stress relaxation behavior) were fully tested and analyzed. The static mechanical properties analysis show that the tensile and impact strength of JP/LLDPE composites are decreased as the JP contents increase, while the flexural strength of the composites is obviously improved. When the addition contents of JP reach 20wt%, the JP/LLDPE composite exhibit optimal flexural strength, which is 63.57% higher than that of pure LLDPE. Dynamic mechanical analysis confirms that the increase of JP contents is beneficial to improve the rigidity, creep resistance and stress relaxation of JP/LLDPE composites, but the increase of temperature adversely affects the creep resistance and stress relaxation resistance of JP/LLDPE composites.

Keywords: jujube pit; low density polyethylene; composites; waste utilization; mechanical properties

我国是红枣的原产地，枣树栽培面积及产量位居世界首位[1]。红枣中氨基酸含量丰富，营养价值和药用价值极高，被誉为“果中皇后”。借助精深加工工艺，红枣可用于生产各色副食品和保健品，经济效益极佳[2-3]。然而，红枣精深加工之前要进行去核处理，过程中产生大量待处理的枣核 (JP) 废弃物。JP 可通过碳化处理制备活性炭吸附剂，以吸附工业废水中的色素及其他杂质[4]。然而，碳化工艺能耗高、产能小，大部分 JP 仍被作为废弃物直接丢弃，造成巨大的资源浪费和严重的环境污染。因此，寻求经济合理的废弃物再加工工艺，实现枣核废弃物的有效利用，对于缓解环境和资源压力具有重要的意义。

近年来，通过简单的生产工艺将生物质废弃

收稿日期：2020-07-06; **录用日期**：2020-08-30；**网络首发时间**：2020-09-10 14:21:22
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200909.004
基金项目：国家重点研发计划项目 (2018YFD1101001)
通信作者：韩祥生，博士，讲师，硕士生导师，研究方向为生物基材料 E-mail: hanxs@sdut.edu.cn

引用格式：卢文玉，蔡红珍，于文凡，等. 枣核/低密度聚乙烯复合材料的力学性能 [J]. 复合材料学报，2021，38(6)：1775-1783.
LU Wenyu, CAI Hongzhen, YU Wenfan, et al. Mechanical properties of jujube pit/linear low density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1775-1783(in Chinese).

物与合成高分子复合，制备木塑复合材料 (WPC) 的技术得到长足发展。所得木塑复合材料展现出良好的力学性能、耐酸碱腐蚀性、尺寸稳定性及加工性能，广泛应用于家具制造、室内外装饰装修、栈道及建筑用材等领域[5-6]。WPC 的发展促进了农林废弃物和废旧塑料的资源化利用，变“废”为“宝”，也在一定程度上缓解了资源危机和环境污染的问题[7]。WPC 的主要原料包括植物纤维和热塑性塑料，常用的天然纤维主要包括木粉、秸秆粉、竹粉、麻纤维、稻壳、椰壳等，来源丰富、成本低廉、易于回收，且可通过纤维种类的选择实现材料强度和韧性等的提升。例如，Mu Binshan 等[8] 以杨木、松木、麦秸秆、竹粉为增强填料，制备高密度聚乙烯 (HDPE) 基木塑复合材料，结果表明，杨木/HDPE 复合材料具有较强的抗拉、抗弯及抗蠕变性能，而麦秸/HDPE 复合材料则具有较高的抗冲击强度和耐水性。朱碧华等[9] 以榛子壳、椰壳及稻壳为填料，以聚氯乙烯 (PVC) 为基体制备复合材料。结果表明，稻壳/PVC 复合材料具有良好的界面结合和力学性能。杨莉等[10] 将椰壳纤维、大麻纤维和聚丙烯 (PP) 混杂，制备复合材料，结果表明，混杂处理后的椰壳-大麻纤维/PP 复合材料力学性能较大麻/PP 复合材料和椰壳/PP 复合材料力学强度得到明显改善。

因此，为充分利用红枣精深加工产生的废弃物 JP，本文选取 JP 填充低密度聚乙烯 (LLDPE) 制备 JP/LLDPE 复合材料，着重研究复合材料的静态力学性能和动态力学性能，评价 JP/LLDPE 复合材料的应用前景，以期寻求切实可行的、绿色经济的 JP 废弃物高效回收利用途径。本工作内容可为 JP 废弃物的可再生利用提供一定的理论指导，对资源回收、环境保护及材料科学的发展均有积极的意义。

1 实验原料及方法

1.1 原材料

枣核 (JP)，125~178 μm，市售干红枣的枣核；LLDPE，型号为 LL405，密度为 0.936 g/cm^3，熔体流动速率为 5.3 g/10 min，购自台湾聚合化学品股份有限公司；润滑剂，型号 TPW604, 购自美国 Struktol 公司；硬脂酸钙，纯度≥99%，购自鼎海塑胶化工有限公司；马来酸酐接枝聚乙烯 (MAPE)，接枝率为 1.2%，购自东莞市华创塑化有限公司。

1.2 JP/LLDPE 复合材料制备

将 JP 粉碎后过筛，取 125~178 μm 的 JP 放入鼓风干燥箱中于 105℃ 干燥 24 h，使其含水率降至 2% 以下；将不同比例的物料 (如表 1) 充分混合，而后放入实验室用微型双螺杆挤出机 (WLG10G，上海新硕有限公司) 混练均匀后挤出至料筒内，再经由实验室用微型注塑机 (WZS10D，上海新硕有限公司) 注塑成型，得到测试所需样条。挤出、注塑温度均为 175℃。

表 1 枣核/低密度聚乙烯 (JP/LLDPE) 复合材料配方

Table 1 Formulations of jujube pit/linear low density polyethylene (JP/LLDPE) composites

wt%

No.	10wt% JP/LLDPE	20wt% JP/LLDPE	30wt% JP/LLDPE	40wt% JP/LLDPE	50wt% JP/LLDPE
JP	10	20	30	40	50
LLDPE	80	70	60	50	40
TPW604	2	2	2	2	2
Calcium stearate	2	2	2	2	2
MAPE	6	6	6	6	6

Note: MAPE—Maleic anhydride grafted polyethylene.

1.3 性能表征

成分分析：参考周吓星等[11] 的方法测定 JP 中纤维素、半纤维素、木质素和灰分的含量。将苯乙醇抽提过的 JP 依次用 72% (w/w) 和 4% (w/w) 的稀硫酸经 2 步水解成容易定量的产物，其中木质素分为酸溶木素和酸不溶木素，酸溶木素通过紫外-可见分光光度计来测定，多糖被水解为单糖然后通过高效液相色谱法来测定。

表面形貌分析：对 JP 及复合材料冲击断面进行喷金处理后利用场发射环境扫描电子显微镜 (SEM，Quanta 250 FEG，美国) 观察表面形貌，扫描电压为 5.0 kV。

静态力学性能：拉伸强度和弯曲强度利用电子万能力学试验机 (WDW1020，长春科新公司) 进

行测试。拉伸强度按 GB/T 1040.2—2006[12] 测试，拉伸速率为 10 mm/min；弯曲强度按 GB/T 9341—2008[13] 测试，弯曲速率为 5 mm/min；根据 GB/T 1843—2008[14]，采用冲击试验机 (XJJ-5，河北承德试验机有限公司) 测试复合材料缺口冲击强度，缺口类型为 A 型，冲击能量为 1 J。测量结果均取五次平均值。

动态黏弹性：复合材料动态黏弹性测试在动态热机械分析仪 (DMA Q800，TA Instruments，美国) 上进行。采用单悬臂梁测试方法，试样尺寸为 35 mm×10 mm×4 mm，测试参数：温度为–50~150℃，升温速率为 5℃/min，频率为 1、2、5 和 10 Hz。

蠕变行为：复合材料的蠕变柔量由动态热机械分析仪 (DMA Q800，TA Instruments，美国) 测试。蠕变采用单悬臂测试方法，试样尺寸为 35 mm×10 mm×4 mm，测试参数：选择 Creep TTS 模式，恒定应力为 1 MPa，频率为 1 Hz，蠕变时间为 30 min，温度为 25、35、45、55 和 65℃。实验之前预热 5 min，使材料受热均匀。

应力松弛行为：复合材料的应力松弛模量借助动态热机械分析仪 (DMA Q800，TA Instruments，美国) 进行测试。应力松弛采用单悬臂测试方法，试样尺寸为 35 mm×10 mm×4 mm，测试参数：选择 Stress Relaxation TTS 模式，恒定应变为 0.1%，频率为 1 Hz，温度为 25、35、45、55 和 65℃。实验之前预热 5 min，使材料受热均匀。

2 结果与讨论

2.1 成分分析

秸秆生物质主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，纤维素通过氢键和范德华力与半纤维素和木质素相结合，纤维素是植物纤维的骨架结构，而半纤维素和木质素则是植物纤维中的粘结物质和填充物质[15]，如表 2 所示，JP 中纤维素、半纤维素和木质素的质量分数分别是 29.73wt%、28.48wt% 和 31.60wt%。可见 JP 中木质素最多，木质素是芳环结构，可为植物提供刚性[16]。组成成分质量分数的差异，可能会对复合材料的力学性能造成一定的影响。

2.2 JP 及 JP/LLDPE 复合材料的微观形貌

图 1 是 500 倍下 JP 及 JP/LLDPE 复合材料冲击断面的 SEM 图像。可见，作为刚性粒子，JP 为块

表 2 JP 的组成成分

Table 2 Composition of JP

wt%

Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Ash	Water extract
29.73±0.51	28.48±0.75	31.60±0.45	1.35±0.36	8.84±0.58

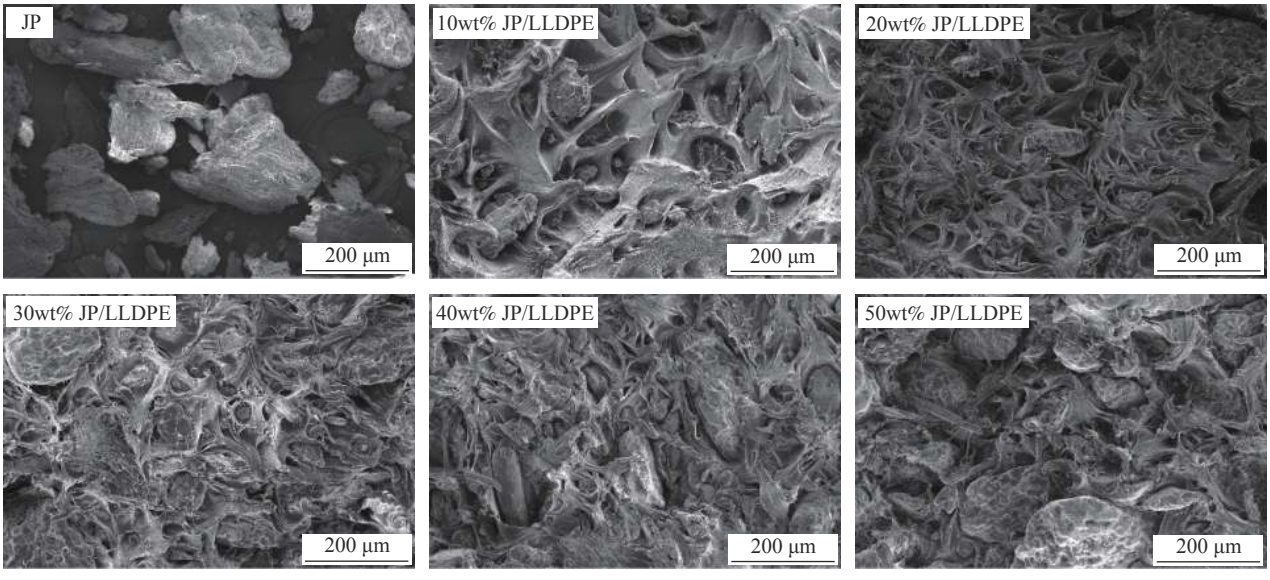

图 1 JP 和 JP/LLDPE 复合材料冲击断面的 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of JP and JP/LLDPE composite impact profiles

状颗粒形态。JP 的添加量对 JP/LLDPE 复合材料的微观结构具有明显的影响。当 JP 含量较低时(10wt%)，其在 LLDPE 基体中的分布相对稀疏。当 JP 含量为 20wt% 时，可见 JP 均匀镶嵌在 LLDPE 基体中，呈现较密集的分布，同时 LLDPE 基体可将 JP 均匀包裹，两者界面结合致密。这种紧密而均匀的组分分布可使材料更好地承受外部作用力的侵袭，有利于材料弯曲性能的提升 (如图 2(b) 所示)。然而，随着 JP 的含量进一步增加，JP 在 LLDPE 基体中的分散变得过于密集，当 JP 含量增加到 50wt% 时，LLDPE 的连续性受到很大程度的破坏，JP 颗粒不能均匀分散在 LLDPE 中，团聚现象严重，导致复合材料力学性能降低，特别是抗冲击强度大幅度降低 (如图 2(c) 所示)。

2.3 JP/LLDPE 复合材料的静态力学性能

图 2 是 LLDPE 和 JP/LLDPE 复合材料的静态力学性能。可以看出，JP/LLDPE 复合材料的拉伸强度、冲击强度均随 JP 含量的增加而降低，而弯曲强度则随着 JP 含量的增加呈现先上升后下降的变化趋势，这与其他文献中植物纤维增强复合材料的结果相似[17]。不同于纯塑料的应力是由聚合物分子链承担的，生物质复合材料的应力主要是由生物质颗粒承担的[18]。JP 作为刚性颗粒，在受到拉伸应力作用时，不会产生较大的形变，且 JP 的加入使 LLDPE 的连续性受到破坏，LLDPE 抵抗拉伸变形的能力降低，从而复合材料的拉伸强度随 JP 含量增加而下降 (如图 2(a) 所示)。

当 JP 含量为 10wt% 时，JP/LLDPE 复合材料的弯曲强度较纯 LLDPE 有一定的提升，这可归因于 JP 的刚性及其与 LLDPE 基体的良好结合[19]。当 JP 含量为 20wt% 时，结合图 1 可知，JP 均匀镶嵌在 LLDPE 基体中，LLDPE 将 JP 均匀包裹，两者界面结合情况良好，弯曲应力通过 LLDPE 基体传递给具有较高强度的 JP 颗粒，使复合材料表现出较高的抗弯曲应变能力，故此时复合材料的弯曲强度达到了最大值 14.1 MPa，较纯 LLDPE 弯曲强度 (8.62 MPa) 提高了 63.57%。而随着 JP 含量的进一步增加，复合材料的弯曲强度逐渐下降，这是由于过量的 JP 导致填料出现团聚趋势，JP 和 LLDPE 之间的接触面积减少，LLDPE 基体无法完全包裹 JP，从而导致复合材料的弯曲强度下降 (如图 2(b) 所示)。

纤维素与木质素的含量与材料的硬度相关性最强[20]。由于 JP 中纤维素和木质素含量较高，故 JP/LLDPE 复合材料的硬度较高。JP 作为刚性颗粒，其与 LLDPE 基体复合时，会在组分间形成界面。在受到冲击外力作用时，组分间界面处受到应力作

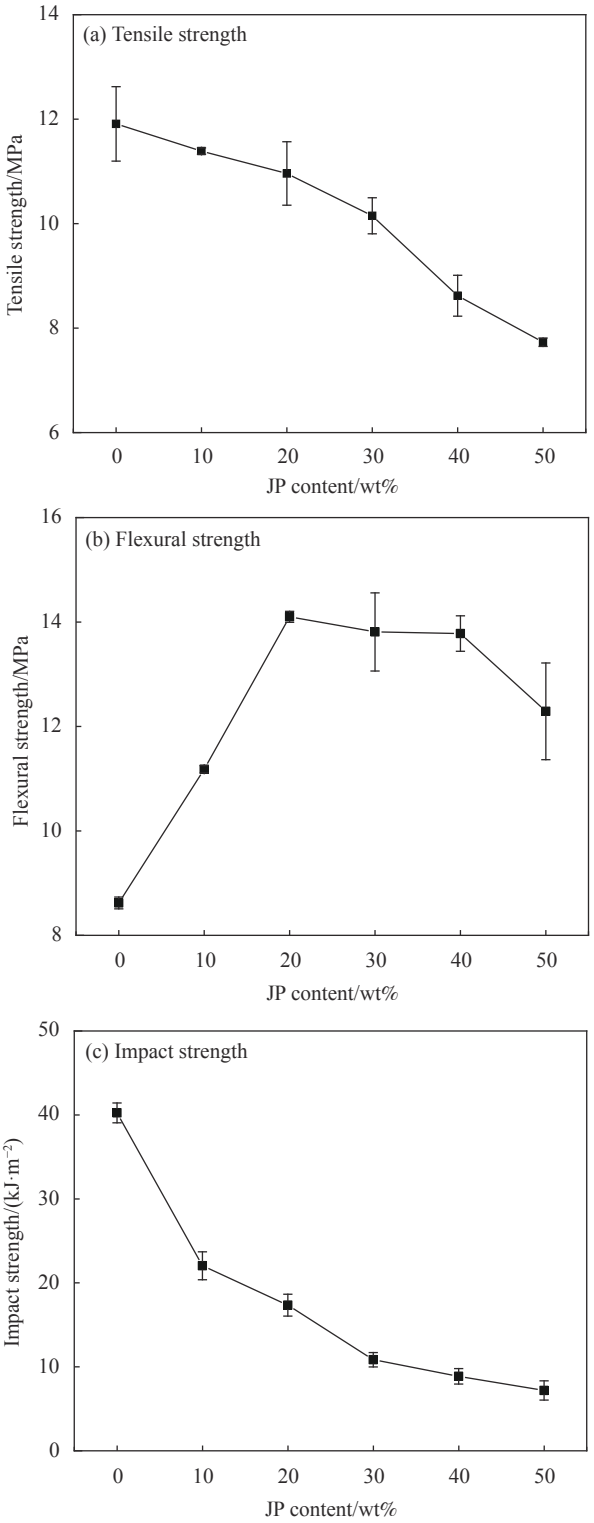

图 2 LLDPE 和 JP/LLDPE 复合材料的静态力学性能

Fig. 2 Static mechanical properties of LLDPE and JP/LLDPE composites

用会产生银纹结构。但 JP 的刚性大，其在复合材料中的刚性效应大于银纹效应，故材料脆性增加而韧性降低[21]。由图 2(c) 可知，随着 JP 含量的增加，复合材料的硬度和刚性增强，脆性变大，韧性变小，故冲击强度随着 JP 含量的增加而一直降低。

2.4 JP/LLDPE 复合材料的动态黏弹性

图 3 是单频 (1 Hz) 条件下 LLDPE 和 JP/LLDPE 复合材料储能模量和损耗因子与温度的关系图。由图 3(a) 可知，复合材料的储能模量 (E') 均随温度的升高而降低，这是由于温度升高使复合材料分子运动量增大，聚合物基体出现松弛现象，E' 减小，抵御变形的能力减弱，刚性降低[22]。此外，随着 JP 含量的增加，复合材料 E'逐渐增加。在 JP 含量为 50wt% 时，复合材料 E'最大值为 2 583 MPa，是纯 LLDPE 最大值 (1 532 MPa) 的 1.69 倍。这是由于随着 JP 刚性粒子填充含量的增加，JP 与 LLDPE 基体间相互作用逐渐增强，JP 更好地限制了 LLDPE 基体分子链的滑移，增大了复合材料的刚度[23]，从而 E'也逐渐增加。

损耗因子 tanδ 是损耗模量与储能模量的比值，可反映材料的韧性，tanδ 越小，韧性越小。由图 3(b) 可知，在温度低于 125℃ 时，JP 含量高的 JP/LLDPE 复合材料的 tanδ 较低，表明 JP 含量的增加降低了复合材料的韧性，这与冲击试验结果相吻合。温度低时，tanδ 较低，温度升高，tanδ 逐渐增大。特别地，当温度超过 125℃ 时，复合材料的 tanδ 呈现骤然增长的趋势。这是由于复合材料达到了玻璃化转化温度，分子链剧烈运动所致[24]，过高的温度使复合材料由玻璃态转化为高弹态，复合材料黏性骤然增大。

复合材料的动态黏弹性与温度、含量及频率有关，表明频率对复合材料动态黏弹性的影响也是非常显著的。图 4 为 JP 含量为 40wt% 的 JP/LLDPE 复合材料的储能模量和损耗因子与频率的关系。由图 4(a) 可知，频率 f对复合材料的 E'影响不大，随着 f的增加，E'呈现微小的增加趋势，说明 f对复合材料刚性的影响较弱。在温度低于 125℃ 时，复合材料的 tanδ 随着频率增加而降低，说明较高的频率对复合材料的韧性会产生不利的影响。当温度超过 125℃，复合材料的 tanδ 呈现骤然增长的趋势，如图 4(b) 所示，可以看出频率对曲线的整体形状没有影响。

2.5 JP/LLDPE 复合材料的蠕变行为

图 5 为不同条件下 JP/LLDPE 复合材料的蠕变曲线。图 5(a) 为 45℃ 下不同 JP 含量对 JP/LLDPE 复合材料蠕变行为的影响。可知，六条曲线的形状基本保持一致，均展现出复合材料蠕变行为典型的 3 个阶段：瞬时形变、初始蠕变和定常蠕变阶段[25]。随着 JP 含量的增加，JP/LLDPE 复合材料的蠕变柔量逐渐降低，说明 JP 的加入有助于提高复合材料抵抗蠕变变形的能力。JP 作为刚性粒子，加入到 LLDPE 基体中有效提高了复合材料的刚度，改善了复合材料的尺寸稳定性。

图 5(b) 是 40wt%JP 含量的 JP/LLDPE 复合材料在不同温度下的蠕变曲线。复合材料的蠕变性能除受填料含量、蠕变时间影响外，温度的影响也

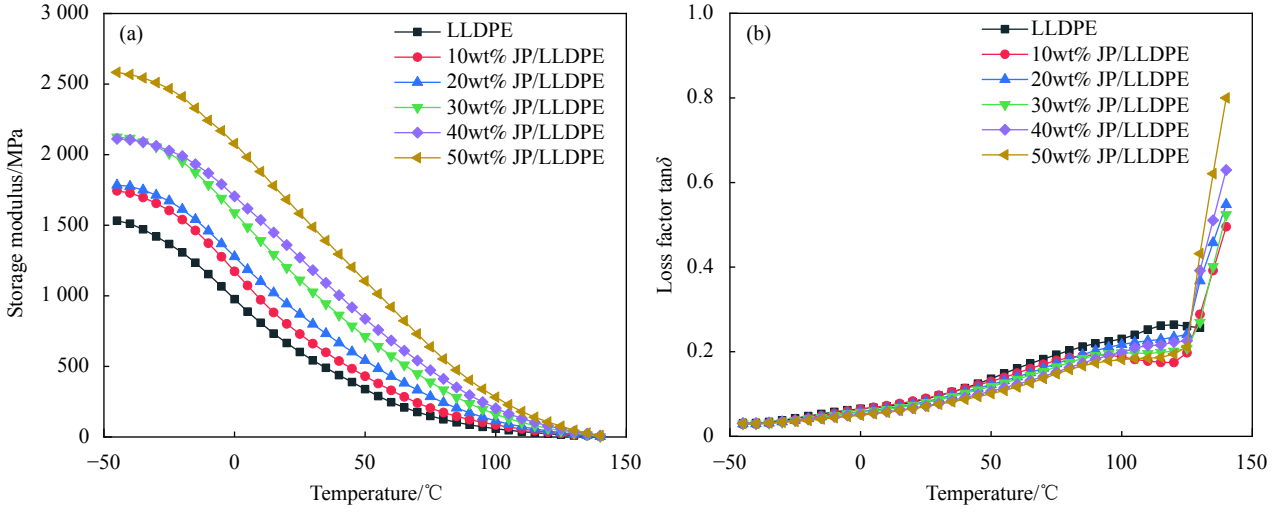

图 3 LLDPE 和 JP/LLDPE 复合材料的储能模量 (a) 和损耗因子 (b) 与温度的关系

Fig. 3 Relationship between storage modulus (a) and loss factor (b) of LLDPE and JP/LLDPE composites with temperature

很显著。可以看出，随着温度的升高，复合材料的蠕变柔量逐渐增大，表明温度的升高对复合材料的抗蠕变性能产生了不利的影响。由于高温加剧了复合材料的蠕变响应[26]，聚合物基体分子链的热能增加，分子热运动加剧，抵抗蠕变变形的能力降低，致使复合材料的抗蠕变性能变差。

2.6 JP/LLDPE 复合材料的应力松弛行为

图 6 是 JP/LLDPE 复合材料在不同条件下的应力松弛曲线。图 6(a) 为 JP/LLDPE 复合材料在 45℃ 下的应力松弛曲线。可以看到，所有复合材料的应力松弛模量均随着时间的推移而逐渐减小，最终趋近于一个平衡值。而随着 JP 含量的增加，应力松弛模量逐渐增大，说明 JP 的加入能提高复合材料的抗应力松弛能力。这是由于 JP 的加入，材料内部自由体积减少，交联程度增大[27]，进而限制了 LLDPE 基体分子链的移动，且 JP 含量越高，复合材料的抗应力松弛能力越强，JP/LLDPE 复合材料的结构和抗变形性也更加稳定。

材料的应力松弛行为与时间、填料含量有关，与温度也有很大的相关性。图 6(b) 是 40wt% 的 JP/LLDPE 复合材料在不同温度下的应力松弛模量曲线。可知，温度对复合材料的抗应力松弛性能产生了不利的影响，即随着温度的升高，复合材料的应力松弛模量降低，抗应力松弛能力下降。这是由于高温使复合材料内部分子获得的能量增大，分子热运动加剧，维持恒定应变所需的应力

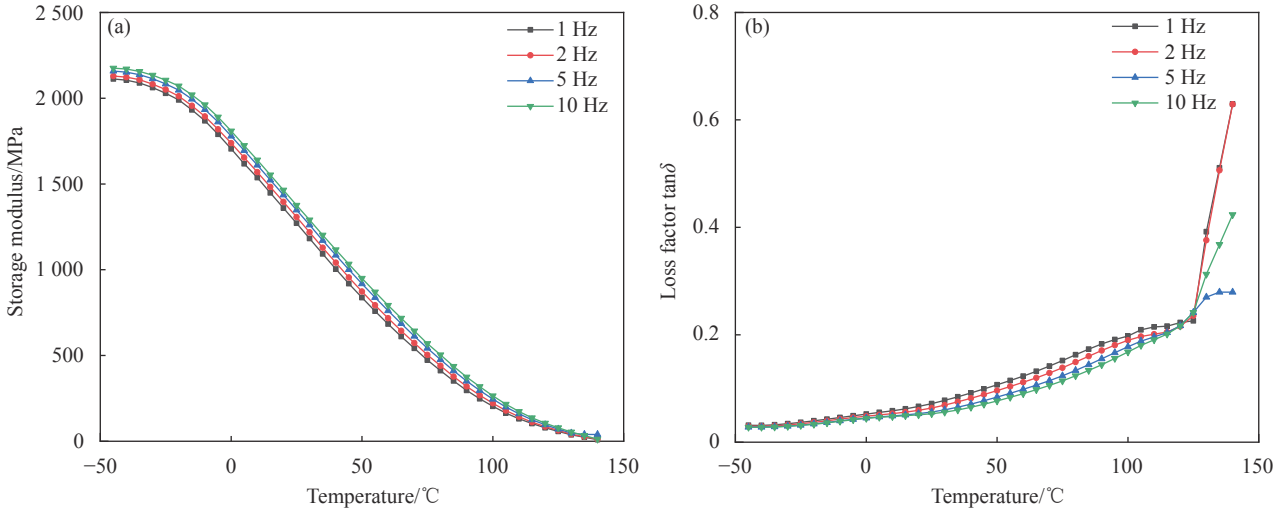

图 4　LLDPE 和 JP/LLDPE 复合材料的储能模量 (a) 和损耗因子 (b) 与频率的关系

Fig. 4　Relationship between storage modulus (a) and loss factor (b) of LLDPE and JP/LLDPE composites with frequency

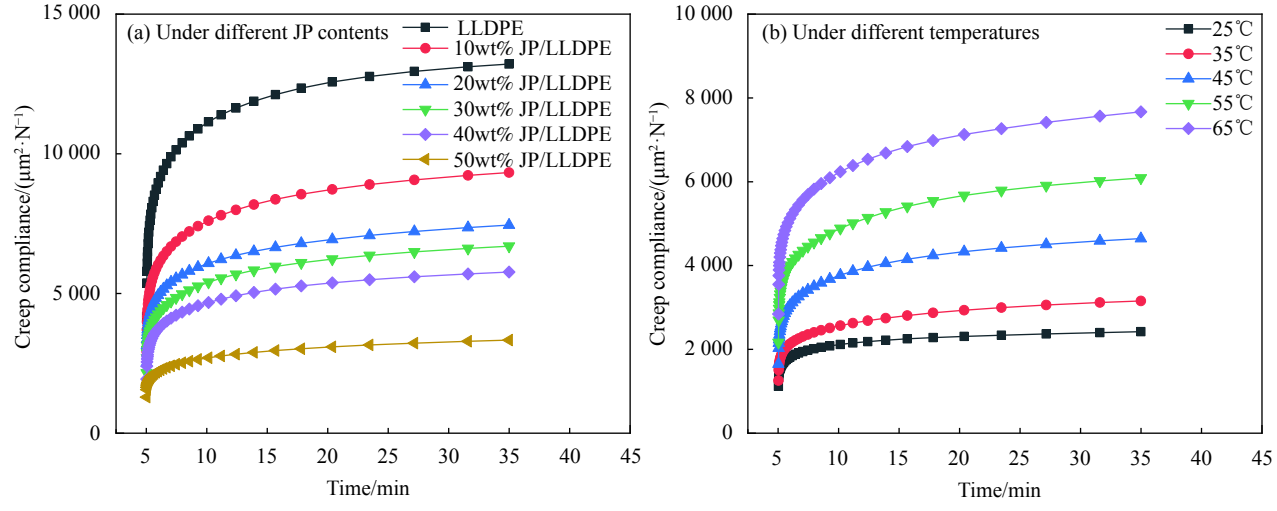

图 5　JP/LLDPE 复合材料在不同条件下的蠕变曲线

Fig. 5　Creep curves of JP/LLDPE composites under different conditions

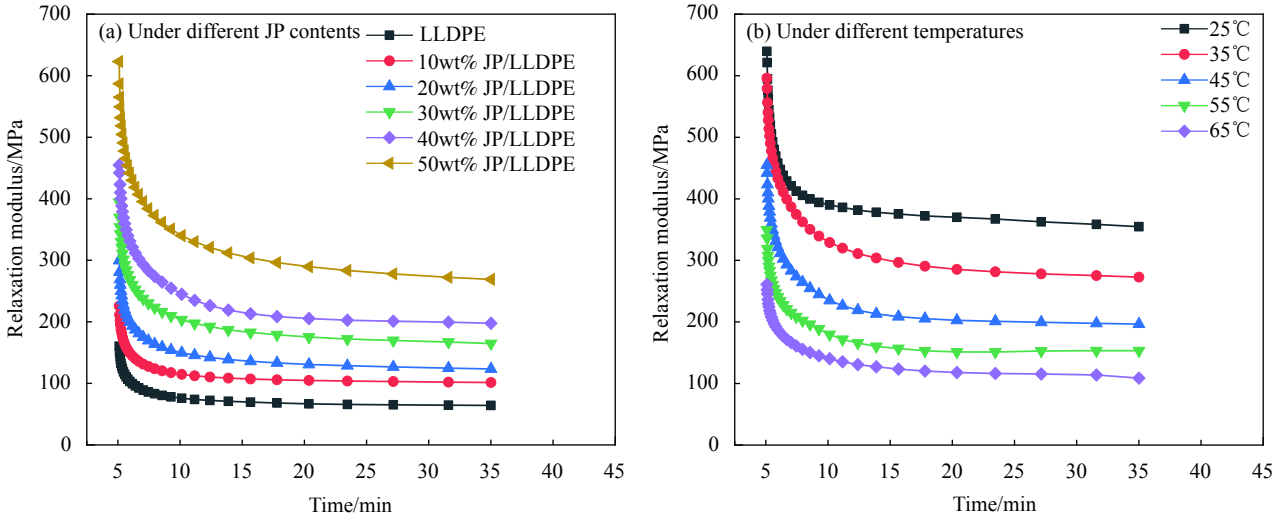

图 6 JP/LLDPE 复合材料在不同条件下的应力松弛曲线

Fig. 6 Stress relaxation curves of JP/LLDPE composites under different conditions

响应时间极大缩短，进而复合材料抗应力松弛的性能也就下降。

3 结 论

(1) 枣核 (JP) 含量的增加，使 JP/低密度聚乙烯 (LLDPE) 复合材料拉伸强度和冲击强度下降，但弯曲强度得到了改善，20wt%JP/LLDPE 复合材料的弯曲强度最优，较纯 LLDPE 弯曲强度提高了 63.57%；

(2) JP 含量的增加，明显增大了 JP/LLDPE 复合材料的储能模量，提高了复合材料的刚性。而频率对 JP/LLDPE 复合材料储能模量的影响并不大，复合材料的刚性随频率增加呈现微弱的增强趋势；

(3) JP 的加入，有效提高了复合材料的抗蠕变性能和抗应力松弛能力，但是温度的升高会降低复合材料的抗蠕变性能和抗应力松弛能力。

参考文献：

[1] 康宁波, 尚梦玉, 何建国, 等. 链式气动冲切自动化干红枣去核机设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22)：19-26.
KANG N B, SHANG M Y, HE J G, et al. Design of chained pneumatic punching automatic dried jujube pit removing machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22)：19-26(in Chinese).

[2] 马朝锋, 刘凯, 杨军良, 等. 红枣去核机技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3)：108-116.
MA Z F, LIU K, YANG J L, et al. Progress on the technology of the red jujube kernel removing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3)：108-116(in Chinese).

[3] 周靖博, 张淑娟, 孙海霞, 等. 我国红枣去核机的研究现状与发展趋势[J]. 山西农业科学, 2014, 42(2)：199-202.
ZHOU J B, ZHANG S J, SUN H X, et al. Research status and development trend of jujube kernel removing machine in China[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(2)：199-202(in Chinese).

[4] PANDHARIPADE S L, MOHARKAR Y, THAKUR R. Synthesis of adsorbents from waste materials such as ziziphus jujube seed & mango kernel[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012：1337-1341.

[5] 王清文, 易欣, 沈静. 木塑复合材料在家具制造领域的发展机遇[J]. 林业工程学报, 2016, 1(3)：1-8.
WANG Q W, YI X, SHEN J. Tailoring wood-plastic composites for furniture production: Possibilities and opportunities[J]. China Forestry Science and Technology, 2016, 1(3)：1-8(in Chinese).

[6] 申婷文, 孙亚楠, 刘一楠, 等. 单板贴面木粉/高密度聚乙烯复合材制备及表面胶合性能研究[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4): 101-107.
SHEN T W, SUN Y N, LIU Y N, et al. Study on preparation and adhesion property of veneer overlaid wood flour/high density polyethylene composites [J]. China Forestry Science and Technology, 2020, 5(4): 101-107(in Chinese).

[7] 张庆法, 杨科研, 蔡红珍, 等. 稻壳/高密度聚乙烯复合材料与稻壳炭/高密度聚乙烯复合材料性能对比[J]. 复合材料学报, 2018, 35(11)：3044-3050.
ZHANG Q F, YANG K Y, CAI H Z, et al. Comparison of properties between rice husk/high density polyethylene and rice husk biochar/high density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(11)：3044-3050(in Chinese).

[8] MU B, WANG H, HAO X, et al. Morphology, mechanical properties and dimensional stability of biomass particles/high density polyethylene composites: Effect of species and composition[J]. Polymers，2018，10(3)：308.

[9] 朱碧华, 何春霞, 石峰, 等. 三种壳类植物纤维/聚氯乙烯复合材料性能比较[J]. 复合材料学报, 2017, 34(2)：291-297.
ZHU B H, HE C X, SHI F, et al. Performance comparison of three kinds of husk' s fibers/polyvinyl chloride composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(2)：291-297(in Chinese).

[10] 杨莉, 王孝锋, 邹梨花, 等. 混杂工艺对椰壳-大麻/聚丙烯复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(9)：2093-2100.
YANG L, WANG X F, ZHOU L H, et al. Effects of hybrid process on mechanical properties of coir-hemp/polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2019，36(9)：2093-2100(in Chinese).

[11] 周吓星, 苏国基, 陈礼辉. 竹粉热处理改善竹粉/聚丙烯复合材料的防霉性能[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24)：308-314.
ZHOU X X, SU G J, CHEN L H. Heat-treated bamboo powder improves anti-mold performance of bamboo powder/polypropylene composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2017，33(24)：308-314(in Chinese).

[12] 中国国家标准化管理委员会, 塑料拉伸性能的测定第 2 部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Standardization Administration of People' s Republic of China. Plastics determination of tensile properties-Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics: GB/T 1040.2—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006(in Chinese).

[13] 中国国家标准化管理委员会, 塑料弯曲性能的测定: GB/T 9341—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of People' s Republic of China. Plastics-Determination of flexural properties: GB/T 9341—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).

[14] 中国国家标准化管理委员会, 塑料悬臂梁冲击强度的测定: GB/T 1843—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of People' s Republic of China. Plastics-Determination of izod impact strength: GB/T 1843—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).

[15] 张东红, 周亮, 任夏瑾, 等. 山楂核/聚乙烯复合材料的力学性能与热性能[J]. 塑料科技, 2020, 48(5)：71-76.
ZHANG D H, ZHOU L, REN X J, et al. Mechanical and thermal properties of hawthorn seed/polyethylene composites[J]. Plastics Science and Technology，2020，48(5)：71-76(in Chinese).

[16] ARORA A, NANDAL P, SINGH J, et al. Nanobiotechnological advancements in lignocellulosic biomass pretreatment[J]. Materials Science for Energy Technologies，2020，3：308-318.

[17] 王博闻, 路琴. 聚氯乙烯/秸秆粉木塑复合材料的性能研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(9)：62-67.
WANG B W, LU Q. Study on properties of poly (vinyl chloride)/wheat straw composites[J]. China Plastics，2017，31(9)：62-67(in Chinese).

[18] GAO H, XIE Y, OU R, et al. Grafting effects of polypropylene/polyethylene blends with maleic anhydride on the properties of the resulting wood-plastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2012，43(1)：150-157.

[19] HAO X, ZHOU H, WANG Q, et al. Reinforcement of wood flour/HDPE composite with a copolyester of p-hydroxy benzoic acid and 2-hydroxy-6-naphthoic acid: Reinforcement of wood flour/HDPE composite with a copolyester of p-hydroxy benzoic acid and 2-hydroxy-6-naphthoic acid[J]. Journal of Applied Polymer Science，2019，136(15)：47338.

[20] LUO Z, LI P, CAI D, et al. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk[J]. Industrial Crops and Products，2017，95：521-527.

[21] 龚维, 高家诚, 何力, 等. 微发泡聚丙烯/晶须复合材料的发泡行为与力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(3)：67-70, 75.
GONG W, GAO J C, HE L, et al. Foam behavior and mechanical property of PP/whisker microcellular foam composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering，2011，27(3)：67-70, 75(in Chinese).

[22] REN W, ZHANG D, WANG G, et al. Mechanical and thermal properties of bamboo pulp fiber reinforced polyethylene composites[J]. Bioresources，2014，9(3)：4117-4127.

[23] 王翠翠, 程海涛, 羡瑜, 等. 纳米$CaCO_3$增强竹浆纤维/环氧树脂复合材料的动态力学性能[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6)：281-287.
WANG C C, CHENG H T, XIAN Y, et al. Improving dynamic mechanical property of bamboo pulp fiber reinforced epoxy resin composite treated by nano calcium carbonate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2017，33(6)：281-287(in Chinese).

[24] 郝建秀, 杜凤, 王伟宏. 短切碳纤维表面处理对木粉/高密度聚乙烯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2)：298-303.
HAO J X, DU F, WANG W H. Effect of surface treatment of short carbon fibers on the properties of wood flour/high density polyethylene composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(2)：298-303(in Chinese).

[25] 邵笑, 何春霞, 姜彩昀. 木质纤维/PVC复合材料的蠕变和热稳

定性[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(6)：991-995.
SHAO X, HE C X, JIANG C Y. Study on creep and thermal stability of wood fiber/PVC composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering，2019，37(6)：991-995(in Chinese).

[26] TAMRAKAR S, LOPEZANIDO R, KIZILTAS A, et al. Time and temperature dependent response of a wood-polypropylene composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2011，42(7)：834-842.

[27] 韦春, 曾思华, 黄绍军, 等. 剑麻纤维素微晶增强酚醛树脂复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(S1)：306-310.
WEI C, ZENG S H, HUANG S J, et al. Preparation and properties of sisal fiber cellulose microcrystal reinforced phenol-formaldehyde resins composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2013，30(S1)：306-310(in Chinese).