

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180227.002

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

张庆法^{1, 2}, 杨科研³, 蔡红珍^{*1, 2}, 孔令帅^{1, 2}, 刘建彪^{1, 2}, 姜成雅^{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;

3. 北京林业大学 材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 采用挤出法制备稻壳/高密度聚乙烯(HDPE)和稻壳炭/HDPE 复合材料。利用 SEM、XRD 对稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料进行表征, 并对其力学性能和抗蠕变性能进行测试对比。结果表明, 稻壳和 HDPE 之间的结合方式与稻壳炭和 HDPE 之间的结合方式存在根本性的差异, 稻壳/HDPE 复合材料表现为稻壳被 HDPE 所包裹, 稻壳炭/HDPE 复合材料表现为 HDPE 嵌入稻壳炭的孔隙中; 稻壳和稻壳炭的加入都会影响 HDPE 基复合材料的结晶峰强度, 但不会对其微晶结构产生影响; 无论是抗弯强度、拉伸强度还是抗蠕变强度, 稻壳炭/HDPE 复合材料都远远强于稻壳/HDPE 复合材料。

关键词: 稻壳; 稻壳炭; 高密度聚乙烯; 力学性能; 抗蠕变性能

中图分类号: TM332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2018)11-3044-07

Comparison of properties between rice husk/high density polyethylene and rice husk biochar/high density polyethylene composites

ZHANG Qingfa^{1, 2}, YANG Keyan³, CAI Hongzhen^{*1, 2}, KONG Lingshuai^{1, 2}, LIU Jianbiao^{1, 2}, JIANG Xuya^{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;

3. College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The extrusion method was applied to prepare rice husk/high density polyethylene (HDPE) and rice husk biochar/HDPE composites. The morphological properties of the rice husk/HDPE and rice husk biochar/HDPE composites were evaluated by SEM and XRD analysis, the mechanical properties and creep resistance of composites were also observed and compared. The results show that the combination of rice husk/HDPE composites is so different from rice husk biochar/HDPE composites: rice husk/HDPE composites show that the husk is covered by HDPE, rice husk biochar/HDPE composites show HDPE is embedded in the pores of rice husk biochar; The XRD shows that both rice husk and rice husk biochar can affect the intensity of the peaks of the composites but have little effect on the crystallite structure; And whether it is bending, tensile or creep resistance, rice husk biochar/HDPE composites are much stronger than those of rice husk/HDPE composites.

Keywords: rice husk; rice husk biochar; high density polyethylene; mechanical properties; creep resistance

我国木材资源总量供应严重不足, 但是林业废弃物却达到每年 2 亿吨; 同时我国是农业大国, 农

业资源十分丰富, 每年大约有 7 亿吨的农业废弃物, 我国农林业废弃物的总量居于世界首位^[1]。农

收稿日期: 2017-11-20; 录用日期: 2018-01-25; 网络出版时间: 2018-02-28 14:10

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180227.002>

基金项目: 2016 年山东省重点研发计划(重大关键技术)(2016ZDJS11A01); 山东省泰山学者特聘专家; 山东省高等学校优势学科人才团队培育计划

通讯作者: 蔡红珍, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为农业工程 E-mail: chzh666666@126.com

引用格式: 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 Qingfa, YANG Keyan, CAI Hongzhen, 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).

林业废弃物属于重要的生物质资源, 对农林业废弃物进行有效的资源化处理可以实现由“废”到“宝”的质的转变^[2]。近年来, 发展迅速的木塑复合材料便是生物质能资源化利用的典范代表之一。木塑复合材料是将木屑、竹屑、稻壳等农林废弃物破碎后, 以纤维或粉末形态作为填料添加到高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)等热塑性塑料中, 利用传统的塑料加工工艺, 通过挤出、热压、注塑等加工方法制备的一种新型材料, 该类材料具有良好的木质感、机械强度、耐候性、耐微生物性、耐腐蚀性、防水防火性等优点, 且可回收再次加工^[3]。木塑复合材料的发展为解决我国每年产生的大量农林废弃物和废旧塑料开辟了新的途径, 在一定程度上解决了环境污染和资源短缺的难题。但木塑复合材料仍然存在界面结合差、产品成本较高等不可忽视的问题。一方面, 由于木质材料表面大量的亲水性极性基团与非极性的热塑性塑料之间很难充分混合, 导致材料内部存在大量空隙, 致使木塑复合材料的机械强度不佳, 因此许多学者通过采用对木质材料改性处理及添加界面相容剂等方法来提高木塑复合材料的界面相容性。Islam 等^[4]对不同的木粉进行预处理后制备木塑复合材料, 结果表明, 预处理可以明显改善木塑复合材料的物理力学性能。王伟宏等^[5]将偶联剂处理过的玄武岩纤维加入到木塑复合材料中, 复合材料的相容性得到改善, 其拉伸强度和冲击强度也得到明显提高。另一方面, 国内一般的木塑复合材料中木质纤维的填充量均在 50wt% 以下^[6-7], 而过高的木质纤维填充量会对木塑复合材料的力学性能产生不利影响, 因此价格较高的热塑性塑料、偶联剂及界面相容剂等费用也大大增加了木塑复合材料的生产成本。

作为生物质能有效利用的另一种方式, 生物质热解液化技术在理论研究方面取得了很大的进展, 其产物共分为生物油、不可冷凝气体和生物炭三种^[8]。生物油可以作为燃料在燃油锅炉、发动机及涡轮机中使用, 经过精炼之后的生物油可以在一定程度上替代柴油汽油, 生物油中的有机物也可提取大量的化学产物^[9]。不可冷凝气体既可以燃烧为进一步热解提供热量也可以直接引走作为燃料使用, 其利用潜力相当可观^[10]。而热解产生的残炭, 即生物炭在土壤改良剂方面具有巨大的价值和意义^[11]。生物炭可由生物质在特定的缺氧或无氧条件下经高温裂解得到, 是一种具有高度芳香化、富

含碳素的多孔固体颗粒物质, 它含有大量的碳和植物营养物质, 具有丰富的孔隙结构、较大的比表面积且表面含有较多的含氧活性基团^[12-13]。近年来, 有部分学者在利用生物炭和聚合物制备复合材料方面进行了探究。Das 等^[14]将部分生物炭加入到木塑复合材料中, 并测试了其力学性能, 结果发现, 生物炭的加入可以有效提高木塑复合材料的冲击强度、拉伸强度。You 等^[15]以木炭增强超高分子量聚乙烯制备高分子复合材料, 其拉伸强度可达到 90 MPa。

木塑复合材料的力学性能主要取决于植物纤维和塑料基体本身强度及它们之间的结合强度, 因此木质填料的选取极为重要。朱碧华等^[16]以榛子壳、椰壳、稻壳为填料, 以聚氯乙烯(PVC)为基体制备木塑复合材料, 结果表明: 稻壳/PVC 复合材料的界面结合最好, 力学强度最高。因此, 本文选取稻壳作为填料进行试验并采用稻壳炭代替稻壳制备复合材料, 并测试其相关性能进行对比, 比较两者之间的性能差别, 进而探究生物炭/塑料复合材料的性能优势。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

高密度聚乙烯(HDPE), 9001, 台湾聚合化学品股份有限公司; 稻壳粉, 平均粒径为 150 μm, 自制; 稻壳炭, 平均粒径为 150 μm, 由稻壳在 N₂ 气氛下 500℃ 快速热解得到; 微细轻质碳酸钙, 粒径为 10 μm, 高安市佳白钙业有限公司; 木塑润滑剂, TPW613, Struktol 美国。

1.2 复合材料制备

将稻壳及稻壳炭分别放入干燥箱内在 105℃ 的条件下干燥 24 h, 使其含水量降至 2% 以下, 然后按照表 1 的配方(质量比)配好材料于交叉转轴双运动混合机(JHX-1-5, 郑州金泰金属材料有限公司)中混合 10 min, 最后将混合物料放入双螺杆挤出机(BP-8177, 宝品精密仪器有限公司)进行挤出, 六区的温度设置为: 135℃、145℃、155℃、165℃、175℃、185℃, 送料速度和挤出速度均为 30 r/min, 挤出板材的厚度为 4 mm, 挤出成型后, 复合材料试样加工成待测性能所需要的尺寸。表 1 为稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料的设计配方, 配方中稻壳或稻壳炭填料与 HDPE 基体的质量为 100 g, 所有原料质量总和为 118 g; 受挤出成型方法的限

制, 稻壳及稻壳炭填料的质量分数(占稻壳或稻壳炭+HDPE)上限均为70wt%。

表1 稻壳/高密度聚乙烯(HDPE)和稻壳炭/HDPE复合材料配方

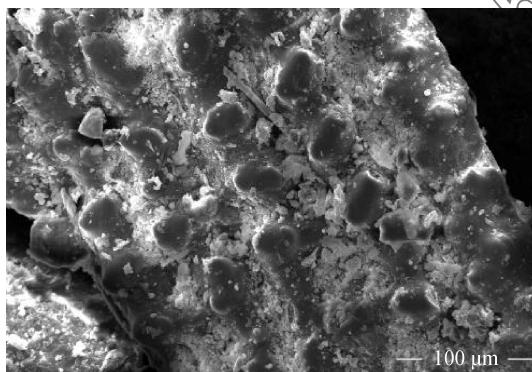
Table 1 Formulations of rice husk/high density polyethylene (HDPE) composites and rice husk biochar/HDPE composites

No.	1	2	3	4	5	g
HDPE	30	40	50	60	70	
Rice husk or rice husk biochar	70	60	50	40	30	
TPW613	3	3	3	3	3	
CaCO ₃	15	15	15	15	15	

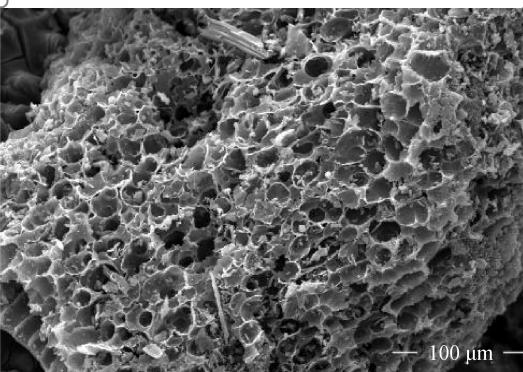
1.3 性能表征

微观表征: 对稻壳、稻壳炭粉末、稻壳/HDPE复合材料、稻壳炭/HDPE复合材料冲击断面进行喷金处理后利用场发射SEM(FEI Sirion 200, 美国)观察微观形貌。

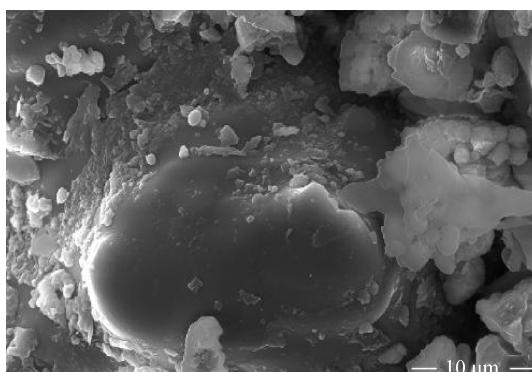
结晶性能分析, 利用XRD(Bruker AXS D8 Advance, 德国)对试样进行分析。操作电压为40 kV, 电流为50 mA, 扫描范围为5°~60°, 扫描速度为5°/min。



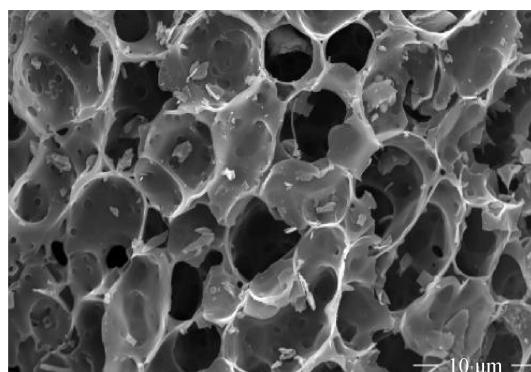
(a) Rice husk



(b) Rice husk biochar



(c) Rice husk



(d) Rice husk biochar

力学性能测试: 稻壳/HDPE复合材料和稻壳炭/HDPE复合材料样品由万能制样机(ZHY-W, 承德试验机有限公司)切割成不同尺寸待测。抗弯强度和拉伸强度均通过电子万能试验机(WDW1020, 长春科新公司)测试, 抗弯强度试件尺寸为80 mm×10 mm×4 mm, 抗弯跨距为64 mm, 加载速度为2 mm/min。拉伸试件尺寸为160 mm×10 mm×4 mm, 加载速度为10 mm/min。以上实验均为室温条件, 取5次平均值作为测试结果。

蠕变试验: 稻壳/HDPE复合材料和稻壳炭/HDPE复合材料样品的蠕变柔量由动态热机械分析仪(DMA Q800, TA Instruments, 美国)进行测试。蠕变试验采用双悬臂夹具, 选择Creep TTS模式, 恒定应力设置为1 MPa, 频率设置为1 Hz, 蠕变时间为30 min, 温度设置分别为35°C、45°C、55°C、65°C。实验之前预热5 min, 以保证材料内部充分受热。

2 结果与讨论

2.1 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 微观形貌

图1为稻壳和稻壳炭在不同放大倍数下的

图1 稻壳和稻壳炭的SEM图像

Fig. 1 SEM images of rice husk and rice husk biochar

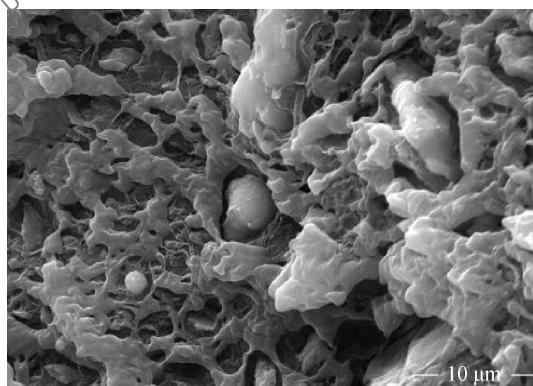
SEM 图像。由图 1(a) 和图 1(c)可以看出, 稻壳的外表面分布有相对固定、密集的锥形突起, 而且突起比较光滑, 这与 Liou^[17]得出的结论是一致的, 即稻壳外表面是分布规律的波纹结构。而这种结构与图 1(b)和图 1(d)形成了鲜明对比, 可以看出, 稻壳在 500℃快速热解条件下得到的稻壳炭的表面是由孔径不同的圆形或椭圆形孔隙结构组成, 这种孔隙结构与木炭^[18-19]的微观结构相类似。稻壳与稻壳炭微观结构的巨大差异, 会对其作为填料制备的复合材料性能产生重要影响。

图 2 为稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料冲击断面的 SEM 图像。可以看出, 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的结合方式存在明显差异。由图 2(a)可知, 稻壳被 HDPE 完全覆盖住, 且稻壳比较均匀地分布在 HDPE 之中, 此结果与一般的木塑复合材料的微观结构是一致的^[20]。而随着稻壳含量增加(如图2(c)所示), 稻壳不能被 HDPE 完全包裹住, 稻壳/HDPE 复合材料内部出现裂痕和缺口, 不利于填料和基体的结合。

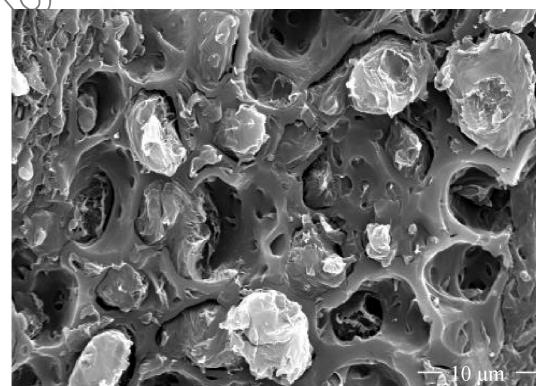
由图 2(b)可知, 稻壳炭/HDPE 复合材料的内部结合方式与稻壳/HDPE 复合材料是完全不同的, HDPE 较为均匀地嵌在稻壳炭的孔隙结构中, 复合材料样品被冲断时 HDPE 被抽出的断裂痕迹也很明显。由图 2 (d)可知, 尽管稻壳炭含量达到 70wt%, 稻壳炭/HDPE 复合材料内部并未出现裂痕和缺口, 且分布更加均匀, 说明在一定范围内, 稻壳炭含量的增加有利于稻壳炭与 HDPE 基体之间界面的结合^[21]。

2.2 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 结晶性能

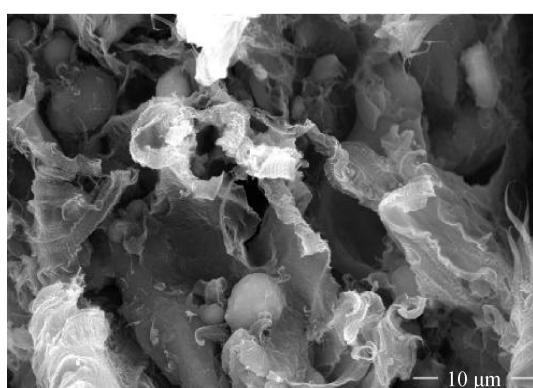
图 3 是稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料的 XRD 图谱。可以看出, 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的 XRD 图像变化趋势相似。无论是稻壳/HDPE 复合材料或稻壳炭/HDPE 复合材料, 两个主要特征峰都在 $\theta=21.74^\circ$ 和 23.98° 处, 分别对应于 (110) 和 (200) 两个晶面, 与 HDPE 的特征峰^[22]相同, 说明无论是稻壳还是稻壳炭的加入都没有改变 HDPE 的衍射位置。此外, 稻壳与稻壳炭对 HDPE 结晶峰强度的影响趋



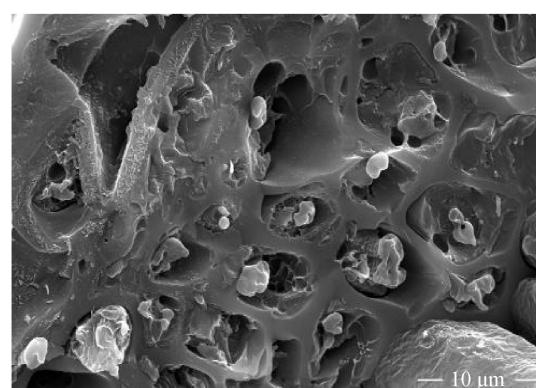
(a) 30wt% rice husk



(b) 30wt% rice husk biochar



(c) 70wt% rice husk



(d) 70wt% rice husk biochar

图 2 稻壳/HDPE 复合材料与稻壳炭/HDPE 复合材料冲击断面的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of the broken impact sections of rice husk/HDPE composites and rice husk biochar/HDPE composites

势也基本相似, 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的结晶峰强度都会随着填料含量的增加而减弱。总之, 稻壳及稻壳炭的加入会对复合材料的结晶峰强度产生影响, 但是对其微晶结构影响不大。

2.3 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 力学性能

图 4 为稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料的力学性能。可以看出, 随着稻壳含量增加, 稻壳/HDPE 复合材料的抗弯强度、拉伸强度先增大后减小, 而随着稻壳炭含量的增加, 稻壳炭/HDPE 复合材料的抗弯强度、拉伸强度都不断增大, 两种复合材料的力学性能差异较大。对稻壳/HDPE 复合材料而言, 当稻壳含量较低时, 稻壳可以均匀地分散在 HDPE 基体中, HDPE 可以很好地包裹住稻壳, 含量越大, 分散越均匀, 力学强度越高; 而随着稻壳含量进一步增大, 达到 60wt% 甚至 70wt% 时, HDPE 含量相对减少, 稻壳已经不能被基体完全包裹, HDPE 基体中的团聚开始增强, 稻壳和 HDPE 之间的界面结合被削弱, 稻壳/HDPE

复合材料的应力集中和缺陷开始产生^[23], 力学性能开始降低, 导致抗弯强度、拉伸强度都呈现出下降的趋势。而对于稻壳炭/HDPE 复合材料, 随着稻壳炭含量增加, 复合材料的力学性能不断上升, 而且抗弯强度最高达到了 53 MPa, 远远超过了稻壳/HDPE 复合材料的抗弯强度。主要原因包括两个方面: (1) 稻壳炭与 HDPE 之间的结合方式完全不同与稻壳/HDPE 复合材料, HDPE 嵌入稻壳炭孔隙中, 结合比较紧密, 稻壳炭含量越高, 两者结合越均匀, 强度越高; (2) 稻壳与稻壳炭的内部存在差异, 稻壳炭由稻壳热解得到, 内部并没有亲水性羟基等官能团的存在, 有利于其与疏水性的 HDPE 之间的界面结合, 稻壳炭在稻壳炭/HDPE 复合材料中表现为刚性粒子, 可以有效增强复合材料的内部结构^[24]。因此, 稻壳炭/HDPE 复合材料的力学性能表现出明显的优势。

2.4 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 抗蠕变性能

图 5 为稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料(稻壳及稻壳炭含量均为 40wt%)在不同

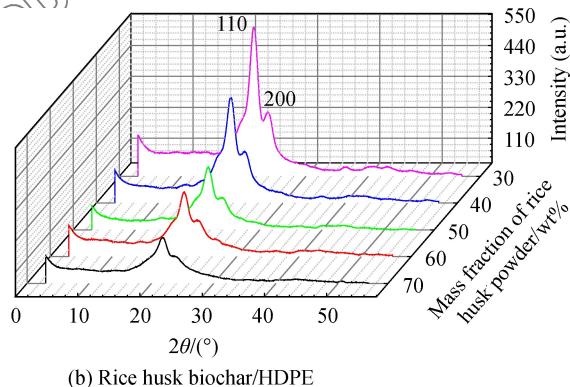
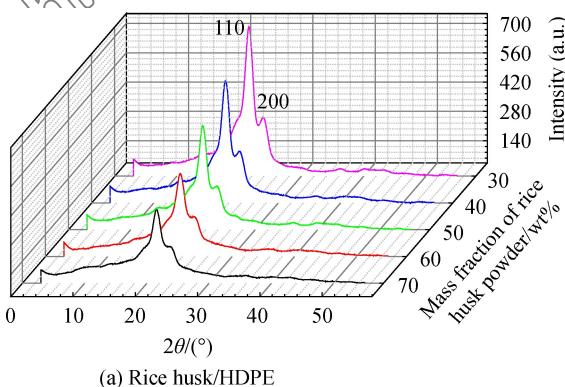


图 3 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of rice husk/HDPE and rice husk biochar/HDPE composites

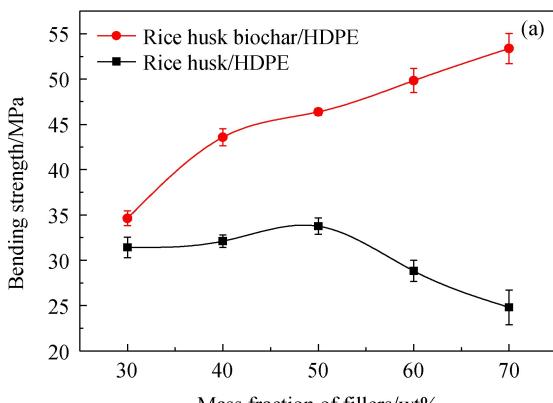


图 4 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料的抗弯强度和拉伸强度

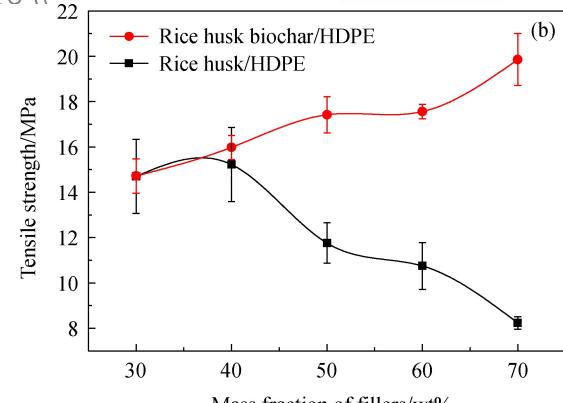


Fig. 4 Bending strength and tensile strength of rice husk/HDPE and rice husk biochar/HDPE composites

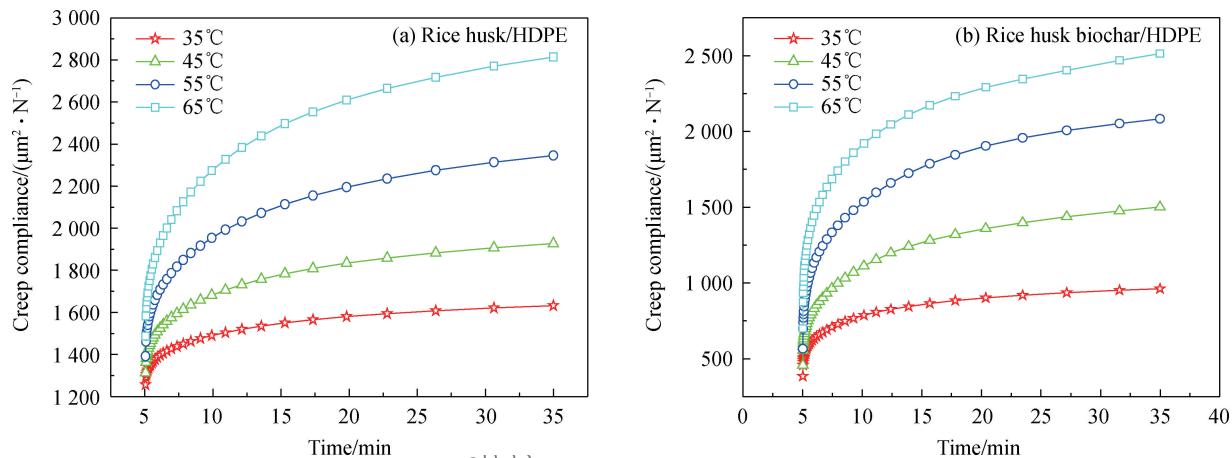


图 5 稻壳/HDPE 和稻壳炭/HDPE 复合材料(稻壳及稻壳炭含量均为 40wt%)在不同温度下蠕变柔量曲线

Fig. 5 Effects of temperature on creep behavior of rice husk/HDPE and rice husk biochar/HDPE composites
(rice husk or rice husk biochar content is 40wt%)

温度下的 30 min 蠕变柔量曲线。可以看出, 随着时间的增加, 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的蠕变柔量都不断增大。高分子复合材料的蠕变行为除了与时间相关, 还与温度密切相关。温度对两种复合材料蠕变行为的影响基本相似, 随着温度的升高, 两种复合材料的蠕变柔量都显著增大, 抗蠕变性能降低, 且温度越高, 越明显。这是由于随着温度的升高, 聚合物分子链的热运动加剧, 材料内部分子之间碰撞、重排等活动也随之加剧, 复合材料难以维持固定的形状, 进而产生形变, 尺寸稳定性变差^[25]。

图 6 为稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料(稻壳及稻壳炭含量均为 40wt%)

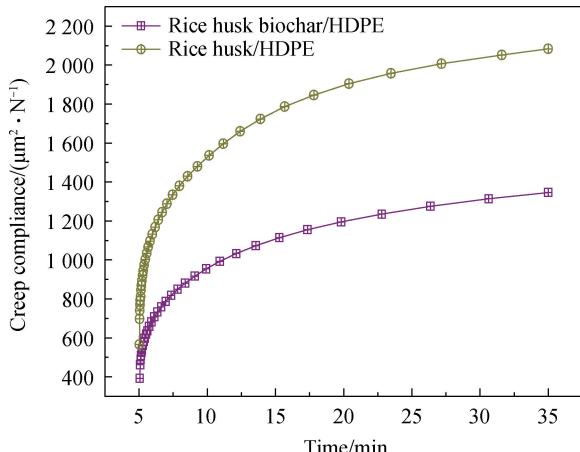


图 6 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料(稻壳及稻壳炭含量均为 40wt%)55℃下蠕变柔量曲线

Fig. 6 Creep compliance curves of rice husk/HDPE composites and rice husk biochar/HDPE composites
(rice husk or rice husk biochar content is 40wt%) at 55°C

在 55℃ 条件下蠕变柔量曲线。可知, 两者的蠕变趋势基本相似, 但是在同一温度下, 稻壳炭/HDPE 复合材料的蠕变柔量要远远小于稻壳/HDPE 复合材料, 稻壳炭/HDPE 复合材料的抗蠕变性能更强。由图 2 分析可知, 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的内部结合方式有很大差异, 稻壳炭的孔隙结构能够阻碍 HDPE 的流动与膨胀, 两者相互缠绕, 结合非常紧密, 具有明显的增强作用, 相比稻壳而言, 稻壳炭对复合材料的刚性增强效果更为明显。因此, 在同一温度下, 相同含量填料的稻壳炭/HDPE 复合材料的抗蠕变性能更强。

3 结 论

(1) 稻壳/高密度聚乙烯(HDPE)复合材料的内部结合方式与稻壳炭/HDPE 复合材料明显不同, 前者表现为稻壳分散在 HDPE 中, 被 HDPE 所包裹; 后者表现为 HDPE 嵌入稻壳炭的孔隙中, 两者相互缠绕。

(2) 稻壳及稻壳炭等填料的加入会减弱稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的结晶峰强度, 但是对其微晶结构影响不大。

(3) 稻壳/HDPE 复合材料和稻壳炭/HDPE 复合材料的抗蠕变性能都随着温度的升高而降低, 但总体而言, 无论是抗弯强度、拉伸强度还是抗蠕变性能, 稻壳炭/HDPE 复合材料都远远强于稻壳/HDPE 复合材料。

参考文献:

- 方农机, 2017, 48(7): 59-60.
- NIE L H. Current situation and development strategy of agricultural waste recycling in China[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 59-60 (in Chinese).
- [2] PEREZ D D S, DUPONT C, GUILLEMAIN A, et al. Characterisation of the most representative agricultural and forestry biomasses in france for gasification[J]. Waste & Biomass Valorization, 2015, 6(4): 515-526.
- [3] AYRILMIS N, KAYMAKCI A. Fast growing biomass as reinforcing filler in thermoplastic composites: Paulownia elongate wood[J]. Industrial Crops & Products, 2013, 43 (1): 457-464.
- [4] ISLAM M S, HAMDAN S, HASAN M, et al. Effect of coupling reactions on the mechanical and biological properties of tropical wood polymer composites[J]. International Biodegradation & Biodegradation, 2012, 72: 108-113.
- [5] 王伟宏, 卢国军. 硅烷偶联剂处理玄武岩纤维增强木塑复合材料[J]. 复合材料学报, 2013, 30(s1): 315-320.
- WANG W H, LU G J. The silane coupling agent treatment of basalt fibers reinforced wood-plastic composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30 (s1): 315-320 (in Chinese).
- [6] 胡圣飞, 胡伟, 陈祥星, 等. 木粉/聚丙烯木塑复合泡沫材料吸能特性[J]. 复合材料学报, 2013, 30(5): 94-100.
- HU S F, HU W, CHEN X X, et al. Energy absorption properties of wood flour/polypropylene foamed composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5): 94-100 (in Chinese).
- [7] 宋丽贤, 张平, 姚妮娜, 等. 木粉粒径和填量对木塑复合材料力学性能影响研究[J]. 功能材料, 2013, 44(17): 2451-2454.
- SONG L X, ZHANG P, YAO N N, et al. Effect of particle size and filling amount of wood flour on mechanical properties of wood plastic composites[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(17): 2451-2454 (in Chinese).
- [8] 路冉冉, 商辉, 李军. 生物质热解液化制备生物油技术研究进展[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(3): 54-59.
- LU R R, SHANG H, LI J. Research progress biomass pyrolysis technology for liquid oil production[J]. Biomass Chemical Engineering, 2010, 44(3): 54-59 (in Chinese).
- [9] 姚燕, 王树荣, 王琦, 等. 生物油替代动力燃油的研究[J]. 动力工程学报, 2007, 27(3): 458-462.
- YAO Y, WANG S R, WANG Q, et al. Research on utilization of bio-oil as a substitute for fuel-oils for power generation purposes[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27 (3): 458-462 (in Chinese).
- [10] 陆强. 生物质选择性热解液化的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- LU Q. Study on selective pyrolysis liquefaction of biomass [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010 (in Chinese).
- [11] 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物炭应用研究进展[J]. 可再生能源, 2012, 30(9): 45-49.
- YUAN Y W, TIAN Y S, ZHAO L X, et al. The research process of the biochar application[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(9): 45-49 (in Chinese).
- [12] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [13] SRINIVASAN P, SARMAH A K. Characterisation of agricultural waste-derived biochars and their sorption potential for sulfamethoxazole in pasture soil: A spectroscopic investigation[J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 471-480.
- [14] DAS O, SARMAH A K, BHATTACHARYYA D. A novel approach in organic waste utilization through biochar addition in wood/polypropylene composites[J]. Waste Management, 2015, 38: 132-140.
- [15] YOU Z, LI D. The dynamical viscoelasticity and tensile property of new highly filled charcoal powder/ultra-high molecular weight polyethylene composites [J]. Materials Letters, 2013, 112: 197-199.
- [16] 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).
- [17] LIOU T H. Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 364(1-2): 313-323.
- [18] HUTTEPAIN M, OBERLIN A. Microtexture of nongraphitizing carbons and tem studies of some activated samples[J]. Carbon, 1990, 28(1): 103-111.
- [19] KYOTANI T. Control of pore structure in carbon[J]. Carbon, 2000, 38(2): 269-286.
- [20] BLEZDKI A K, JASZKIEWICZ A, SCHERZR D. Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2009, 40(4): 404-412.
- [21] ZANG Q, CAI H, REN X, et al. The dynamic mechanical analysis of highly filled rice husk biochar/high-density polyethylene composites[J]. Polymers, 2017, 9(11): 628.
- [22] YONG L, WU Q, FEI Y, et al. Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2007, 38 (7): 1664-1674.
- [23] ARNANDHA Y, SATYARNO I, AWALUDIN A, et al. Physical and mechanical properties of WPC board from Sengon sawdust and recycled HDPE plastic [J]. Procedia Engineering, 2017, 171: 695-704.
- [24] 沈小军, 孟令轩, 付绍云. 石墨烯多壁碳纳米管协同增强环氧树脂复合材料的低温力学性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 21-26.
- SHEN X J, MENG L X, FU S Y. Cryogenic mechanical properties of epoxy composites synergistically reinforced by graphene-multi-walled carbon nanotubes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 21-26 (in Chinese).
- [25] GEORGIOPoulos P, KONTOU E, CHRISTOPoulos A. Short-term creep behavior of a biodegradable polymer reinforced with wood-fibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 80: 134-144.