西南林业大学学报
Journal of Southwest Forestry University

木质素与咖啡壳粉制备木塑复合材料的性能研究

李方方 徐志伟 张晓媛 罗蓓 秦磊 夏炎

Study on Preparation and Properties of Wood Plastic Composites with Coffee Shell Powder and Lignin

Li Fangfang, Xu Zhiwei , Zhang Xiaoyuan, Luo Bei, Qin Lei, Xia Yan

引用本文:
李方方, 徐志伟, 张晓媛, 罗蓓, 秦磊, 夏炎. 木质素与咖啡壳粉制备木塑复合材料的性能研究[J]. 西南林业大学学报, 2021, 41(3):139-146. doi: 10.11929/j.swfu.202001043
Li Fangfang, Xu Zhiwei , Zhang Xiaoyuan, Luo Bei, Qin Lei, Xia Yan . Study on Preparation and Properties of Wood Plastic Composites with Coffee Shell Powder and Lignin[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2021, 41(3):139-146. doi: 10.11929/j.swfu.202001043

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11929/j.swfu.202001043

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静电纺丝法制备酶解木质素与聚乙烯醇混合纤维薄膜的研究

The Preparation of Enzymatic Hydrolysis Lignin/PVA Blended Fiber Membrane by Electrospining

西南林业大学学报. 2018, 38(2): 165 https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.02.025

木质素基碳纤维力学性能的研究进展

Research Progress on Mechanical Properties of Lignin-based Carbon Fibers

西南林业大学学报. 2019, 39(3): 176 https://doi.org/10.11929/j.swfu.201812054

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

木质素改性沥青的短期老化性能研究

Short-term Aging Properties of Lignin Modified Asphalt

西南林业大学学报. 2019, 39(3): 149 https://doi.org/10.11929/j.swfu.201811057

纳米TiO_2制备PUF/TiO_2复合材料的性能研究

Effect of Nano TiO_2 on Properties of PUF/TiO_2 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

木质素-糠醇-乙二醛树脂基砂轮片的制备与测试

Preparation and Testing of Lignin-Furfuryl Alcohol-Glyoxal Resin Based Grinding Wheel

西南林业大学学报. 2018, 38(4): 173 https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.04.027

DOI: 10.11929/j.swfu.202001043
引文格式：李方方, 徐志伟, 张晓媛, 等. 木质素与咖啡壳粉制备木塑复合材料的性能研究 [J]. 西南林业大学学报（自然科学）, 2021, 41(3): 139–146.

木质素与咖啡壳粉制备木塑复合材料的性能研究

李方方　徐志伟　张晓媛　罗　蓓　秦　磊　夏　炎

（西南林业大学材料科学与工程学院，云南 昆明 650233）

摘要： 以碱木质素与咖啡壳粉共同作为原料，与桉木粉、高密度聚乙烯以及助剂等，采用熔融混炼、挤出造粒、热压成型的方法制备木塑复合材料。分析木质素、咖啡壳粉的加入对复合材料力学性能、吸水性能、动态热机械性能等方面的影响；并且全组分测定了咖啡壳粉，分析其与木粉化学成分的差异。结果表明：咖啡壳粉主要化学成分与木粉接近，仅加入木质素制备的 WPC，静曲强度与拉伸强度均随木质素含量的增加呈现先增加后降低的趋势。而加入木质素与咖啡壳粉制备的 WPC 力学强度得到显著的改善，静曲强度可以提高 49.31%，冲击强度提高 16.62%。木质素与咖啡壳粉加入后，各组分之间具有较好的相容性，能够形成均一的体系，表现出更高的热稳定性；同时断面更为密实均匀，体现出更为理想的界面结合性。添加木质素后，WPC 耐腐朽性能得到改善，与仅添加木质素制备的 WPC 相比，加入木质素与咖啡壳粉制备的 WPC 具有更好的耐腐性。可见，碱木质素添加量为 15%，咖啡壳粉为 45% 时，制备的木塑复合材料性能最佳。

关键词： 咖啡壳粉；木质素；高密度聚乙烯；木塑复合材料；耐腐性能

中图分类号： TB33　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 2095−1914(2021)03−0139−08

Study on Preparation and Properties of Wood Plastic Composites with Coffee Shell Powder and Lignin

Li Fangfang, Xu Zhiwei , Zhang Xiaoyuan, Luo Bei, Qin Lei, Xia Yan

(College of Materials Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China)

Abstract: Alkali lignin and coffee shell powder were researched as raw materials in this paper, and wood plastic composites (WPC) were prepared by alkali lignin, coffee shell powder, eucalyptus powder, high density polyethylene (HDPE) and additives through melt mixing, extrusion granulation and hot compression molding. The effects of alkali lignin and coffee shell powder on the mechanical properties, water absorption, dynamic thermal mechanical properties of WPC samples were studied as well, and the main chemical components of coffee shell powder were analyzed. The results showed that the main chemical composition of coffee shell powder was similar close to eucalyptus wood powder. Both the bending strength and tensile strength firstly increased and then decreased with the increasing of lignin content for the lignin group. Whereas, the mechanical properties of WPC samples prepared by alkali lignin and coffee shell powder were significantly improved, with the bending strength was increased by 49.31%, and impact strength was enhanced by 16.62%. The WPC samples prepared by alkali lignin and coffee shell powder displayed good compatibility and a desired uniform interior morphology, contrib-

收稿日期： 2020−01−21；**修回日期：** 2020−04−15
基金项目： 国家自然科学基金地区项目（31860186）资助；中国博士后基金项目（2015M581001）资助。
第 1 作者： 李方方（1995—），女，硕士研究生。研究方向：木质材料科学。Email: 2421061245@qq.com。
通信作者： 夏炎（1979—），女，博士，副教授，硕士生导师。研究方向：木材化学与保护。Email: 630509034@qq.com。

uted to better thermal stability. Through observation on morphology of the fracture surface, it could be concluded that more compact and uniform interface bonding layer, which showed a more preferable interface bonding. Furthermore, the decay resistance against fungi of WPC samples was improved with the lignin addition, and the samples prepared by coffee shell powder and alkali lignin had preferable decay resistance against decay fungi compared with samples prepared with only lignin. Through multi-analysis of experimental results, the optimum formulation was proposed that the addition amount of alkali lignin was 15%, correspondingly the addition amount of coffee shell powder was 45%.

Key words: coffee shell powder; lignin; HDPE; wood plastic composites; decay resistance

木塑复合材料（WPC）主要是指热塑性树脂如聚乙烯（PE）、聚丙稀（PP）等与木纤维在熔融温度下经过处理复合而成的一类高性能、高附加值的新型复合材料，能有效地缓解森林资源匮乏、木材供应紧缺的矛盾，是极具发展前途的绿色环保材料[1-3]。但因木塑复合材料中含有一定数量的木纤维，长期用于户外时，易受使用环境中真菌、细菌等微生物的影响而导致霉变、腐朽[4-5]，劣化后塑料对纤维的包裹作用变小，木纤维受真菌侵蚀的情况下会变严重。Islam 等[6]、Cheng 等[7] 研究在野外土壤中的 WPC 上不仅发现了霉菌，同时也分离得到了白腐菌和褐腐菌。Mankowski 等[8]、Pendleton 等[9] 也发现在地面接触的木塑复合材料会因为真菌或其他生物导致腐朽，在木粉含量高的木塑复合材料中发生了明显的腐朽现象。木质素是自然界中最丰富的聚芳香类天然高分子物质，主要来源于造纸工业，凭借其分子中含有诸多官能团（如羟基、羰基、羧基、甲氧基），具有阻燃、抗菌、热稳定等特性，且价格低廉，无毒、可再生，被认为是一类极具潜力的重要资源，在材料领域中备受关注[10-13]。由于木质素具有较多稳定的苯环结构，自身具有抗菌性，能够提高复合材料的生物耐久性和热稳定性，有学者通过研究发现加入木质素的塑料抗菌性明显高于普通塑料[14-17]，同时也有研究表明，木质素的添加能够明显提高塑料的力学性能[13-14, 18]。因此本研究在木塑复合材料的制备中，加入木质素是期望能够提高木塑复合材料的力学性能，并改善其抗菌性能。

云南省咖啡的种植面积占全国咖啡种植面积的 98%，咖啡壳作为咖啡行业的副产物之一没有得到高效的利用，除了少部分用于生物吸附剂、肥料、木炭燃料外[19-20]，大部分被当作废弃物丢弃，既浪费资源又污染生态环境。将咖啡壳粉作为一种植物纤维材料，与木粉相比成本可以大幅度降低，并且对于云南省木塑复合材料生产企业运输方便，具有可行的应用前景。因此研究其是否可以替代木粉作为原料之一制备木塑复合材料，不仅可以有效地利用资源，还可以节约生产成本。本研究利用木质素、咖啡壳粉共同作为原料与塑料熔融共混制备木塑复合材料，研究了木质素、咖啡壳粉含量变化对复合材料多项性能的影响，讨论木质素、咖啡壳粉在木塑复合材料工业中应用的可能性，一是为了探索木质素的加入是否能够提高复合材料的耐菌性能，另外也考察了咖啡壳粉能否取代木粉制备木塑复合材降低生产成本，旨在为造纸工业副产物木质素、咖啡工业副产物咖啡壳的综合高效利用提供依据，并为木塑复合材料生物耐久性的研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

碱木质素（500 目过滤后的固体粉末），咖啡壳粉（500 目），高密度聚乙烯（HDPE，0.90～0.96 g/cm^3），桉木粉（60 目），相容剂为马来酸酐接枝聚乙烯（MAPE），填料为碳酸钙粉，润滑剂为石蜡，分散剂为硬脂酸。

1.2 实验设置

将木质素放在 GZX−GF101−3−BS−Ⅱ/H 型电热恒温鼓风干燥箱（上海跃进医疗器械有限公司，中国）中 55 ℃ 下干燥 24 h，咖啡壳粉、桉木粉在 105 ℃ 下干燥 4 h。先将 HDPE、咖啡壳粉、木质素、桉木粉、MAPE 和助剂在 JKF 型高速混合机（瑞安市瑞川电器有限公司，中国）中混合 20 min，转速 1 000 r/min，在 YE2−112−4 型双螺杆挤出机（苏州德能电机股份有限公司，中国）中熔融混炼，1 区至 7 区温度分别为 90、180、185、185、185、180、165 ℃，喂料转速为 6 r/min，主机转速为 60 r/min；在 YE2−802−6 型切粒机（泰州市腾跃电机有限公司，中国）中切粒，转速为 20 r/min，

在 160B 型对辊机（沪南橡胶机械配件厂，中国）中热压挤出，辊距为 1 mm，辊筒温度为 170 ℃，最后在 XLB−D−400×400×10 型平板硫化机（上海第一橡胶机械厂，中国）中热压成型，热压温度为 170 ℃，加热预压时间为 6 min，加压时间为 2 min，加压压力为 5 ~ 8 MPa。

实验设置如表 1 所示，Ⅰ组中没有添加咖啡壳粉，仅添加木质素，是由木质素、桉木粉与 HDPE 等制备的木塑复合材，通过木质素含量为零的 T_1 试验进行对比，判断木质素的加入对 WPC 的影响；Ⅱ组中加入了咖啡壳粉，由木质素、咖啡壳粉、桉木粉与 HDPE 等制备的木塑复合材；Ⅲ组中不含木粉，只由木质素、咖啡壳粉、HDPE 等制备木塑复合材。其中Ⅰ组与Ⅱ组“的对比可以用来分析咖啡壳粉的加入对木塑复合材料的影响。与Ⅰ、Ⅱ组对比，Ⅲ组中不含桉木粉，以探索咖啡壳粉能否替代木粉，作为主要原料用于木塑复合材料的制备。

表 1　实验设置

Table 1　Experimental formulas

组别	处理	木质素含量/%	咖啡壳粉含量/%	桉木粉含量/%	HDPE与助剂含量/%
Ⅰ组	T_1	0	0	60	40
	T_2	5	0	55	40
	T_3	10	0	50	40
	T_4	15	0	45	40
	T_5	20	0	40	40
Ⅱ组	T_6	0	30	30	40
	T_7	5	25	30	40
	T_8	10	20	30	40
	T_9	15	15	30	40
	T_{10}	20	10	30	40
	T_{11}	25	5	30	40
Ⅲ组	T_{12}	0	60	0	40
	T_{13}	5	55	0	40
	T_{14}	10	50	0	40
	T_{15}	15	45	0	40
	T_{16}	20	40	0	40
	T_{17}	25	35	0	40

1.3　指标测试方法

1.3.1　咖啡壳粉、木粉的化学组分分析

采用美国可再生能源实验室的方法[21]对咖啡壳粉、桉木粉进行全组分分析，测定咖啡壳粉、桉木粉中纤维素、半纤维素、木质素、灰分及苯醇抽提物的含量，分析比较了 2 种原料主要组要化学成分的差异[22]。

1.3.2　WPC 力学性能、吸水性能的测定

按照 GB/T 9341—2008[23]测试弯曲性能，按照 GB/T 1040.1—2018[24]测试拉伸性能，按照 GB/T 1043—1993[25]测试冲击性能。24 h 吸水率与吸水厚度膨胀率按 GB/T 17657—2013[26]规定的试验条件测定。力学性能、吸水性能每组的测试试样数均为 5 个，计算结果取平均值。

1.3.3　WPC 热学性质、耐腐性能的测定

采用 TM3000 型扫描电子显微镜（天美科学仪器有限公司，中国）观察断面形貌，将样品在 −18 ℃ 折断截取断面，观察 1 000 倍的断面形貌。采用 DMA+300 型动态热机械分析仪（DMA）（Metravib，法国）、DSC 204 F1 型差示扫描量热仪（DSC）（Netzsch，德国）对 WPC 进行热学性质的分析。此外，按照国家标准 GB/T 13942.1—2009[27]对 WPC 试件进行 12 周的室内腐朽实验，测定腐朽后 WPC 的质量损失率，简称为失质率，并观察表面微观形貌特征的变化，试验菌种为密粘褶菌（*Gloeophyllum trabeum*，简称 G.t），腐朽实验中，将既无木质素也无咖啡壳粉的 WPC 试件作为对照试件，通过其在 G.t 作用下腐朽 12 周后的腐朽程度，分析判别 3 组 WPC 试件的抗菌性能。

2　结果与分析

2.1　咖啡壳粉、桉木粉的成分分析

由表 2 可知，咖啡壳粉主要化学成分与木粉接近，并无显著的差异，是一种植物纤维原料，可以作为木质原料用来制备木塑复合材料，但能否替代或部分替代木粉，还需要依据产品的性能来进行评价。因此，本研究还需要对力学性能、吸水性能等指标进行进一步的测定与评价。

表 2　咖啡壳粉与桉木粉的成分分析

Table 2　Ingredients analysis of coffee shell powder and eucalyptus powder　　%

原料种类	纤维素	半纤维素	木质素	灰分	抽提物	总量
咖啡壳粉	42.8	20.5	30.7	0.51	5.49	100
桉木粉	42.9	19	31.6	0.49	6.01	100

2.2　木质素与咖啡壳粉对木塑复合材料力学及吸水性能的影响

由图 1 可知，对于Ⅰ组仅添加木质素制备的 WPC，与木质素含量为零的 T_1 试验相比，木质素

加入后，静曲强度随木质素含量的增加呈现先增加后降低的趋势。相比之下，Ⅱ组与Ⅲ组的静曲强度均高于没有添加咖啡壳粉的Ⅰ组，这是由于咖啡壳粉比木粉颗粒更细，制备木塑复合材时能够与其他各组分形成更为致密的结构，此外，静曲强度呈现出随木质素含量增加先增加后下降的趋势，这是因为随着含量增加，木质素易发生自身团聚使其与HDPE界面结合性下降，导致木塑复合材料的强度下降。

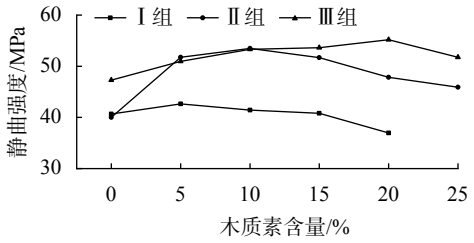


图1 静曲强度与木质素含量的关系

Fig. 1 Relationship between lignin contents with bending intensity of WPC

由图2可知，拉伸强度方面，不含桉木粉的Ⅲ组拉伸强度高于另外两组，并且Ⅰ组与Ⅱ组的拉伸强度均呈现出随木质素含量增加先增加后下降的趋势，这是由于木质素含量增加易发生自身团聚，使其与HDPE界面结合性下降，导致拉伸强度下降。由图3可知，冲击强度方面，Ⅱ组与Ⅲ组的冲击强度均高于没有添加咖啡壳粉的Ⅰ组，这是由于粒径更小的咖啡壳粉加入后，各组分间结合更为紧密，相互作用增强，使得复合材料的界面结合力大大增强，宏观上表现为复合材料的力学性能的提高。同时还可以观察到冲击强度随木质素含量的增加则表现出增长的趋势，这可能是因为在WPC制备中添加MAPE中的极性酸酐键与木质素羟基酯化或形成氢键，非极性聚乙烯链段与HDPE基体相似相容，增强两者的结合力，起到“桥梁”作用促使木质素与HDPE的相容与联结。而木质素具有空间网状结构，在受到外力冲击时，网状结构可以向周围传递应力集中的情况，从而吸收能量，因此冲击强度得到了提高[14, 28-29]。

根据国家标准GB/T 24137—2009[30]中对静曲强度平均值需要大于20 MPa，3组试件的静曲强度均能达到并高于国家标准。在木质素含量为20%时，Ⅲ组与Ⅰ组相比，静曲强度可以提高49.31%，冲击强度也提高了16.62%。因此，加入咖啡壳粉，可以使力学强度得到显著的改善，这应该是因为咖啡壳粉与木粉相比粉末极细、粒径极小，在添加到木塑复合材料体系中后，可以减少填料之间的空隙或孔洞，木质素、咖啡壳粉与HDPE的相互作用也会增强，木塑复合材料内部更加密实，界面结合性提高，因此静曲强度、拉伸强度、冲击强度均得到提高。因此力学性能得到提高[31-33]，同时吸水性能也得以改善[34]。此外，不含木粉的Ⅲ组与含有木粉的Ⅱ组相比，静曲强度也可以提高15.30%，拉伸强度提高了24.13%，冲击强度也提高了13.83%。证明咖啡壳粉可以替代木粉制备木塑复合材料，并且力学强度能够得到改善。

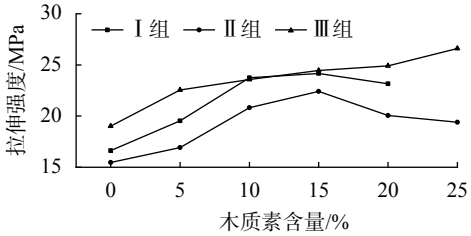


图2 拉伸强度与木质素含量的关系

Fig. 2 Relationship between lignin contents with tensile strengh of WPC

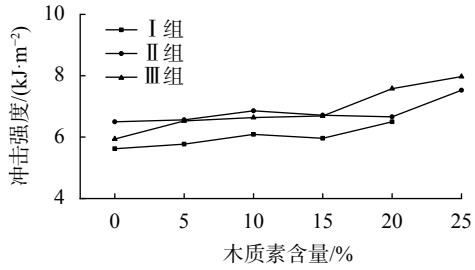


图3 冲击强度与木质素含量的关系

Fig. 3 Relationship between lignin contents with impact strengh of WPC

由图4可知，与Ⅰ组仅添加木质素制备的WPC相比，Ⅱ组与Ⅲ组WPC试件的吸水性更低，尤其是不含木粉的Ⅲ组，在木质素含量为15%，咖啡壳粉含量为45%时，吸水性最小，可见咖啡壳粉的加入进一步降低了木塑复合材料的吸水性能。根据国家标准GB/T 24137—2009[30]中吸水厚度膨胀率小等于0.5%的要求，Ⅲ组在木质素含量为15%时，吸水厚度膨胀率为0.41%，满足国家标准要求，木质素含量为20%时，吸水厚度膨胀率为0.52%，虽然超出标准要求，但比较接近。

综上所述，可以看出在木质素添加量为15%、20%，咖啡壳粉为45%、40%，并且不含木粉的条件下，制备出的木塑复合材料综合性能较佳。

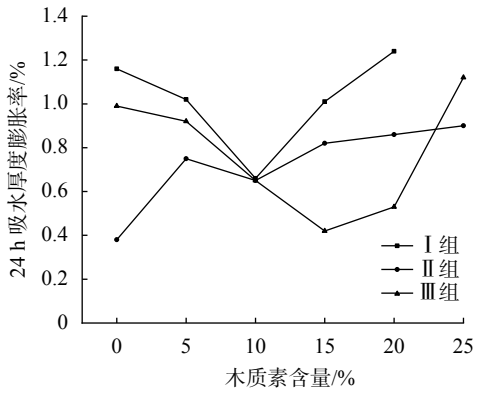


图 4　24 h 吸水厚度膨胀率与木质素含量的关系
Fig. 4　Relationship between lignin contents with water absorption properties of WPC in 24 hours

2.3　木塑复合材料热分析

由图 5 可知，与Ⅰ组相比，Ⅱ组与Ⅲ组的储能模量提高，尤其是不含木粉的Ⅲ组，反映出咖啡壳粉替代木粉加入到复合材料体系中后，由于咖啡壳粉的粒径远小于桉木粉，加入后与木质素、HDPE 等结合更为紧密，相互作用更强，加强了复合材料内部分子间的缠结作用，使界面结合作用增强，聚合物基体分子链运动受阻，从而导致 WPC 试件松弛变慢，因此体现出更高的储能模量[35-39]，反映出加入咖啡壳粉后木塑复合材料具有更高的抵抗外力破坏和抵抗变形的能力。图中还可以看到损耗角正切也出现提高的现象，这是由于反应材料粘弹性特征的损耗角正切得到提高所导致的，反映出加入咖啡壳粉的木塑复合材料对 HDPE 分子运动的禁锢作用更强，这与力学性能的测试结果相吻合[13, 40-42]。因此可以通过动态热机械性能的分析，说明加入咖啡壳粉后，木塑复合材料各组分之间界面结合性能提升更高，从而使外力作用在材料上的应力在整个体系中更好的分散开来，使体系抵抗外力的能力更强，即材料的性能更加优异[43-44]。

由图 6 可知，添加木质素制备的 WPC 只有 1 个熔融峰值温度，说明木质素加入后与各组分有较好的相容性，木塑复合材料体系是完全混溶的，各组分之间没有发生分离，能够形成均一的体系。并且与Ⅰ组仅添加木质素制备的 WPC 相比，Ⅱ组与Ⅲ组的熔融峰值温度略微升高，这是由于粒径更小的咖啡壳粉加入后各组分的分布更均匀，彼此间结合更为紧密，相互作用增强，使复合材料内部分子缠结加剧，阻碍了分子链移动，HDPE 分子链的运动受到约束的程度也有所增大，因此熔融温度也相应升高。热稳定性的提高也反映出咖啡壳粉的加入增加了复合材料内部的结合力[10, 38, 45-49]。

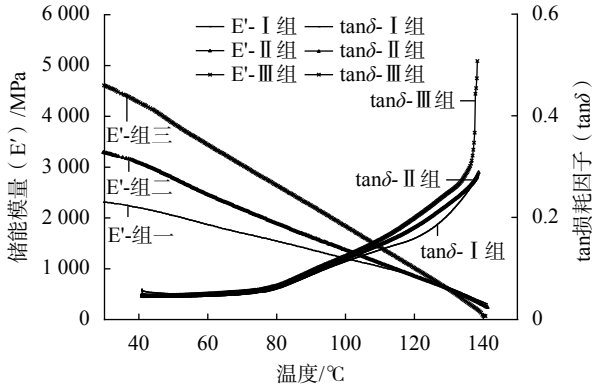


图 5　木塑复合材料的储能模量与损耗因子曲线
Fig. 5　DMA curves of storage modulus and tanδ

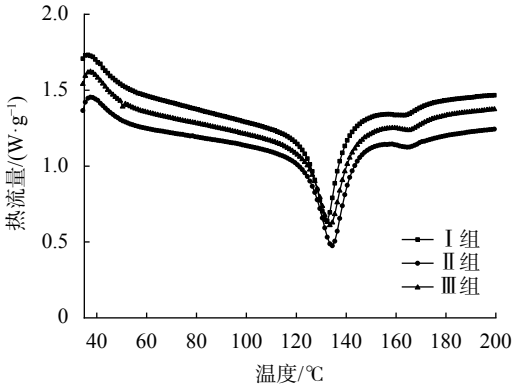
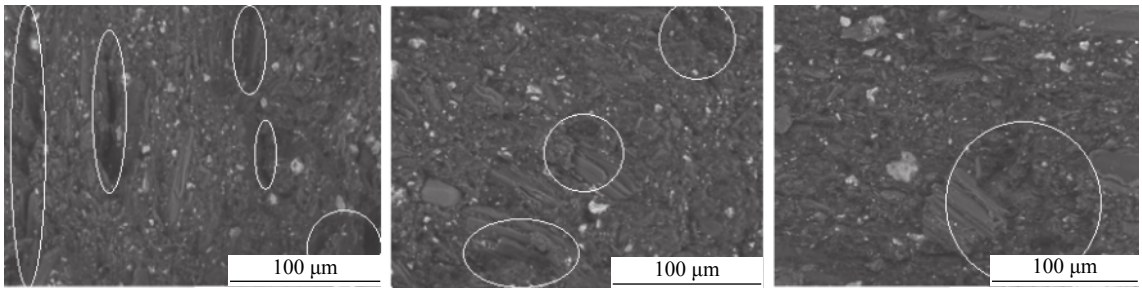


图 6　木塑复合材料的 DSC 曲线
Fig. 6　DSC curves of WPC

通过对木塑复合材料热分析的研究表明，可以得出相比仅添加木质素制备的 WPC，加入咖啡壳粉所制备 WPC 的界面结合性更好，力学性能也更好的结论。

2.4　木塑复合材料断面的微观形貌观察

由图 7 可知，Ⅰ组的断面明显能观察到颗粒被拔出后的孔洞，反映出试件在外力作用下发生了“界面破坏”，力学性能不强。Ⅱ组与Ⅲ组的断面中空隙与孔洞明显减少，WPC 的断面均匀、致密，木质原料被拔断现象明显，反映出复合材料在外力的作用下，不容易发生分离，断面发生“基体破坏”，说明加入咖啡壳粉后，木塑复合材料的材质密实，应力集中点少，传递应力更均匀，WPC 各组分间的结合得到较为明显的改善，这与前面力学、热学性质的分析结果一致，因而制备的 WPC 的力学性能也得到了得到提高。

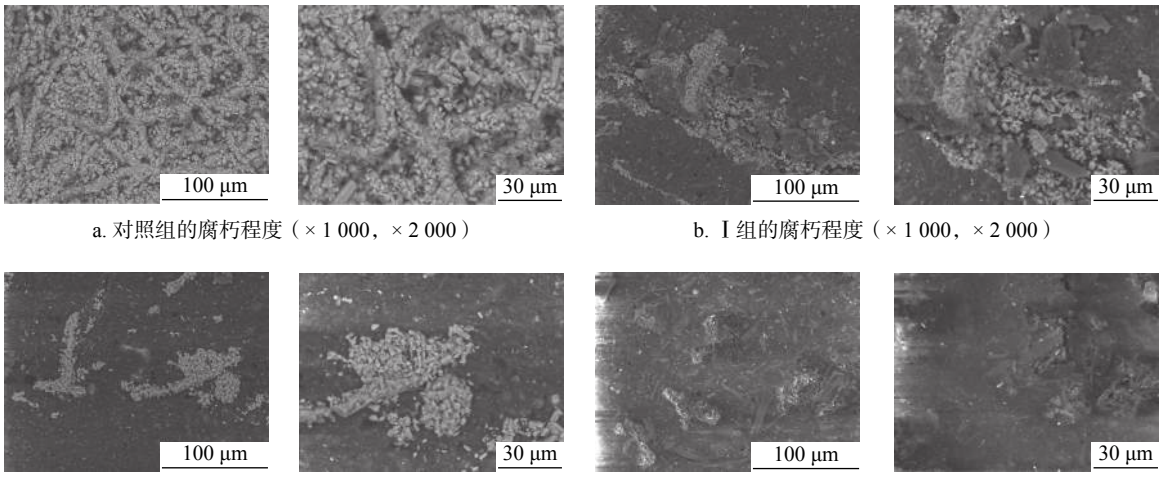


a. Ⅰ组断面形貌　b. Ⅱ组断面形貌　c. Ⅲ组断面形貌

图7　木塑复合材料断面形貌观察

Fig. 7　Observation on fracture surface of WPC

由图8可知，在G.t作用下腐朽12周后，在没有添加木质素与咖啡壳粉的对照组WPC试件表面上布满了腐朽真菌。在Ⅰ组仅添加木质素制备的WPC表面上可以观察到腐朽真菌，并且能观察到较大裂缝，但整体的腐朽情况要好于对照组。相比之下，在图8c～d中，Ⅱ组与Ⅲ组的表面上虽然可以看到腐朽真菌，但整体较少，并且没有明显的裂缝或孔隙。这是因为，由于咖啡壳粉与木粉相比粒径极小，木质素、咖啡壳粉与HDPE之间的结合更为紧密，因此复合材料内部结构更为致密、空隙更少，所以对真菌的侵蚀具有更好的抵抗性。此外，木质素在木材中被称为“生物抗降解屏障”，具有一定的抗菌性，对复合材料的抗菌性能也起到一定的提高作用。



a. 对照组的腐朽程度（×1 000，×2 000）　b. Ⅰ组的腐朽程度（×1 000，×2 000）

c. Ⅱ组的腐朽程度（×1 000，×2 000）　d. Ⅲ组的腐朽程度（×1 000，×2 000）

图8　腐朽试验后木塑复合材料表面微观观察

Fig. 8　Observation on surface of WPC after decay

3　结论与讨论

咖啡壳粉主要化学成分与木粉差异不大，是一种可以用来制备木塑复合材料的木质原料。3组试件的静曲强度均达到并高于国家标准的要求。仅加入木质素制备的WPC，静曲强度与拉伸强度均随木质素含量的增加呈现先增加后降低的趋势。相比之下，加入木质素、咖啡壳粉制备的WPC，由于各组分间结合更为紧密，界面结合作用增强，制备的木塑复合材料内部更加密实，体现出更高的力学性能、储能模量，以及更低的吸水性能，木塑复合材料整体性能得到较为理想的改善。木质素含量为15%时，吸水厚度膨胀率满足国家标准要求，木质素含量为20%时，超出标准要求但比较接近。与不含木质素与咖啡壳粉的WPC相比，添加木质素后WPC抗菌性得到一定提高，并且与仅加入木质素制备的WPC相比，加入木质素、咖啡壳粉制备的WPC体现出更好的耐腐性，应该是因为颗粒更细的咖啡壳粉加入后，复合材料内部结构更为致密均匀，界面结合得到改善，并且木质素具一定的抗菌性，因此复合材料对真菌的侵蚀具有了更好的抵抗性。综合考虑木塑复合材料的多项指标，在木质素添加量为15%，咖啡壳粉为45%时，制得的木塑复合材料综合性能最佳。

[参　考　文　献]

[1] 徐开蒙, 陈太安, 吴章康, 等. 不同木质纤维原料对 PVC 木塑复合材料力学性能的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(5): 88−91.

[2] 李肖肖, 周志芳, 杨兆哲, 等. 纳米氧化锌改性木塑复合材料的抗老化性能 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 81−85.

[3] 王阳阳, 房轶群, 肖泽芳, 等. 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 [J]. 西南林业大学学报（自然科学）, 2018, 38(3): 166−174.

[4] 刘其松. 木塑复合材料的防霉分析与处理 [J]. 林产工业, 2018, 45(11): 59−63.

[5] 史天宏, 朱礼智, 李笑航, 等. 木塑复合材料耐老化性能的研究进展 [J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(4): 7−10.

[6] Islam S M, Hamdan S, Sobuz H R, et al. Thermal and decay-resistance properties of tropical wood-plastic composites [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(12): 1493−1500.

[7] Cheng D L, Jiang S X, Zhang Q S. Mould resistance of Moso bamboo treated by two step heat treatment with different aqueous solutions [J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2013, 71(1): 143−145.

[8] Mankowski M, Morrell J J. Patterns of fungal attack in wood plastic compoaites following exposure in a soil block test [J]. Wood & Fiber Science, 2000, 32(3): 340−345.

[9] Pendleton D E, Hoffard T A, Adcock T, et al. Durability of an extruded HDPE/wood composite [J]. Forest Products Journal, 2002, 52(6): 21−27.

[10] 黄进, 付时雨. 木质素化学及改性材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

[11] 程承, 彭超, 胡博, 等. 木质素改性沥青的短期老化性能研究 [J]. 西南林业大学学报（自然科学）, 2019, 39(3): 149−154.

[12] 付蒙, 陈福林, 岑兰, 等. 木质素的改性及其在塑料中的应用研究进展 [J]. 中国塑料, 2012, 26(11): 14−21.

[13] Laurichesse S, Avérous L. Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers [J]. Progress in Polymer Science, 2014, 39(7): 1266−1290.

[14] 陈红年. 木质素对聚烯烃塑料的改性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[15] 黄曹兴, 何娟, 梁辰, 等. 木质素的高附加值应用研究进展 [J]. 林业工程学报, 2019, 33(1): 17−26.

[16] 孙蒙崖, 刘娜, 傅英娟. 木质素在材料中的应用研究进展 [J]. 现代化工, 2019, 39(2): 31−35.

[17] Jaber N N. The study of bacterial growth on low-density polyethylene- lignin composite [J]. Basrah Journal of Veterinary Research, 2011, 10(1): 97−105.

[18] Peng Y, Liu R, Cao J Z. Characterization of surface chemistry and crystallization behavior of polypropylene composites reinforced with wood flour, cellulose, and lignin during accelerated weathering [J]. Applied Surface Science, 2015(332): 253−259.

[19] 匡钰, 肖兵, 张洪波, 等. 云南咖啡初加工废弃物利用及排放情况调查 [J]. 中国热带农业, 2018(5): 31−36.

[20] 王宇, 李如燕, 李根, 等. 咖啡壳纤维素提取工艺的优化及其微观结构 [J]. 化工进展, 2017, 36(6): 2262−2269.

[21] Sluiter A, Hames B, Scaplata C, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass: Laboratory analytical procedure (LAP)[S]. National Renewable Energy Laboratory, 2012.

[22] 孙少妮. 协同预处理木质纤维组分结构解析及酶解研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

[23] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料弯曲性能的测定: GB/T 9341—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[24] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料拉伸性能的测定: GB/T 1040.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[25] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料简支梁冲击性能的测定第 2 部分: 仪器化冲击试验: GB/T 1043.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[26] 全国人造板标准化技术委员会. 人造板及饰面人造板理化性能试验方法: GB/T 17657—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[27] 全国木材标准化技术委员会. 木材耐久性能第 1 部分: 天然耐腐性实验室试验方法: GB/T 13942.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[28] 陈福泉, 赵永青, 冯彦洪, 等. 木质素/热塑性塑料复合材料界面增容的研究进展 [J]. 化工学报, 2014, 65(3): 777−784.

[29] 肖东升. 高性能聚乙烯复合材料的制备及性能表征 [D]. 福州: 福州大学, 2016.

[30] 全国塑料标准化技术委员会. 木塑装饰板: GB/T 24137—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[31] 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.

[32] 周鲁英. 稻秸纤维/聚乙烯复合材料的工艺研究及性能表征 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.

[33] Koohestani B, Ganetri I, Yilmaz E. Effects of silane

modified minerals on mechanical, microstructural, thermal, and rheological properties of wood plastic composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2017(111): 103−111.

[34] Ramesh R S, Sadashivappa K, Sharanaprabhu L. Physical and mechanical properties: hot pressed phenol formaldehyde based wood plastic composite [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11): 25331−25340.

[35] 任文涵. 竹造纸剩余物/HDPE 复合材料力学及热性能研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.

[36] Zhang X L, Hao X L, Hao J X, et al. Heat transfer and mechanical properties of wood-plastic composites filled with flake graphite [J]. Thermochimica Acta, 2018(664): 26−31.

[37] 孙章建. 木质素/HDPE 复合材料的制备及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[38] 周明松, 孙章建, 杨东杰, 等. 增塑剂对碱木质素/HDPE 复合材料性能影响研究 [J]. 高分子学报, 2014(2): 210−217.

[39] 冯传馨. 木塑复合材料界面作用机理的研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.

[40] Sameni J, Jaffer S A, Sain M. Thermal and mechanical properties of soda lignin/HDPE blends [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2018(115): 104−111.

[41] 杜兰星. 热处理竹/HDPE 复合材料力学及热学性能的研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.

[42] 刘天. 增强壳层结构共挤出 HDPE 基木塑复合材料性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.

[43] 李东方. 聚乙烯木塑复合材料性能影响因子与界面特性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[44] 李腊梅. WPC 界面增容机理与应用性能研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.

[45] Sailaja R R N, Deepthi M V. Mechanical and thermal properties of compatibilized composites of polyethylene and esterified lignin [J]. Materials & Design, 2010, 31(9): 4369−4379.

[46] Abdelwahab M A, Misra M, Mohanty A K. Injection molded biocomposites from polypropylene and lignin: Effect of compatibilizers on interfacial adhesion and performance [J]. Industrial Crops & Products, 2019 (132): 497−510.

[47] 李雪松. 木塑复合材料的制备及其界面稳定性的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

[48] Collins M N, Nechifor M, Tanasă F, et al. Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019(131): 828−849.

[49] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料差示扫描量热法（DSC）第 3 部分: 熔融和结晶温度及热晗的测定: GB/T 19466.3—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

(责任编辑　冯　雪)