

木塑复合材料界面调控及其表征技术研究进展

杨守禄^{1,2} 姬 宁¹ 黄安香¹ 李 丹¹ 吴义强^{2*}

(1.贵州省林业科学研究院,贵阳 550005;2.中南林业科技大学材料科学与工程学院,长沙 410004)

摘 要 木塑复合材料(WPC)是一种高性能、高附加值、环境友好且应用广泛的新型材料,其天然植物纤维和塑料基体间的界面调控成为 WPC 研究的热点和重点。综述了 WPC 界面调控方法,主要包括天然植物纤维调控、塑料基体表面改性、添加改性剂等方法,同时还介绍了 WPC 界面表征技术,如傅里叶红外光谱分析、扫描电子显微镜分析、透射电子显微镜、X 射线光电子能谱分析、动态热机械分析、纳米压痕技术和原子力显微镜分析等表征技术,指出了 WPC 界面调控及其界面表征技术需要解决的问题,以期提高 WPC 的研究和开发水平。

关键词 木塑复合材料,界面调控,表征技术,天然植物纤维,塑料基体

Literature overview on interface control and characterization technique of wood-plastic composite

Yang Shoulu^{1,2} Ji Ning¹ Huang Anxiang¹ Li Dan¹ Wu Yiqiang²

(1.Guizhou Academy of Forestry,Guiyang 550005;2.School of Materials Science and Engineering,Central South University of Forestry & Technology,Changsha 410004)

Abstract As a new type of material,wood-plastic composites (WPC) have been put into wide application for their excellent performance,high added-value and environment-friendly performance.The interface control between natural plant fiber and plastic matrix is a hot or an important research point.The interface control methods,which mainly included natural plant fiber modification,plastic matrix surface modification and adding modifier,were summarized.Meanwhile,the interface characterization technique,which mainly included fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR),scanning electron microscopy (SEM),transmission electron microscopy (TEM),X-ray photoelectron spectroscopy (XPS),dynamic mechanical analysis (DMA),nano-indentation techniques and atomic force microscopy (AFM),were also introduced.Finally,the challenge of interface control and characterization technique was proposed with the aim at promoting the research and development level of WPC.

Key words wood-plastic composite,interface control,characterization technique,natural plant fiber,plastic matrix

木塑复合材料(WPC)是利用天然植物纤维填料(包括木粉、竹粉、稻壳、秸秆及废弃植物纤维等)和塑料为主要原料,应用植物纤维改性、塑料改性及改善界面相容性等技术手段,把废弃的天然植物纤维(木竹材锯末、农作物秸秆等)、废旧塑料与助剂一起熔融、混炼制成颗粒,再加工成型的一种绿色环保、环境友好新型材料^[1]。WPC 具有优良的耐水性能、尺寸稳定性能、力学性能和可循环使用等优点,是废弃木质纤维和废旧塑料再生利用的一个趋

势^[2]。WPC 极大地体现了我国发展“循环经济”和建设“节约型社会”的理念,其发展和应用有助于减少塑料的“白色污染”,既利于保护森林资源,又对废弃物的综合利用、环境保护以及缓解木材日趋紧张的压力具有十分重要的意义,已成为当今木材和塑料加工应用领域的研究热点之一。

WPC 性能优异,被广泛应用于建筑材料、工业材料、包装及运输业、室内装饰材料和文化体育等领域。WPC 中的天然植物纤维化学成分主要为木质

基金项目:贵州省自然科学基金(黔科合基础[2016]1084);贵州省林业科研课题(黔林科合J字[2015]17号);贵州省科技计划课题(黔科合SY字[2014]3069号);贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2014]6020号、黔科合重大专项字[2015]6008号)

作者简介:杨守禄(1987-),男,博士,主要从事生物质复合材料、木竹材功能性改良研究。

联系人:吴义强(1967-),男,博士,长江学者特聘教授,主要从事木材科学、生物质复合材料研究。

素、纤维素、半纤维素以及一些灰分。木质素、纤维素和半纤维素分子链中存在着大量活性羟基、醇羟基和酚羟基基团,易吸潮,因而天然植物纤维表现出较强的极性和亲水性,而废旧塑料则表现为非极性或极性很小,微观上呈非均匀体系,两相存在十分清晰的界面,二者复合时存在类似水与油难以相容的问题。同时,因天然植物纤维分子内存在大量的氢键使其与塑料基体复合时易聚集,分散性不佳,导致复合材料界面粘结性能差、力学性能低,复合材料应用范围受到限制^[3]。笔者从天然植物纤维与塑料基体的结构出发,综述了 WPC 界面调控方法,并对其主要表征技术进行总结。

1 WPC 界面调控方法

WPC 界面调控主要包括天然植物纤维调控(包括物理调控和化学调控)、塑料基体表面改性、添加改性剂等方法。

1.1 天然植物纤维调控

1.1.1 物理调控

物理调控主要包括热处理、蒸汽爆破处理、微波处理等方法。

热处理是将天然植物纤维中的游离水、挥发物及中极性较大的提取物去除,使得部分半纤维素降解,减少天然植物纤维的吸水性,降低天然植物纤维的极性,增强天然植物纤维与塑料的相容性,提高其热稳定性和机械性能。天然植物纤维的干燥处理温度对材料性能有显著影响,110℃条件下干燥 3.5h 可实现材料性能最佳化^[4],而天然植物纤维经 200℃高温碳化改性处理后,WPC 界面结合性能显著提升^[5];另外,热水处理天然植物纤维可提高 WPC 的热稳定性^[6]。天然植物纤维经热水处理后再用一定浓度的碱液处理,获得的 WPC 其抗水性、力学性能及热稳定性均有所提高,并且随着热水处理温度的升高,效果更好^[7]。

蒸汽爆破处理是在密闭容器内处于高压状态的水蒸气先进入纤维素的非晶区,引发纤维素润胀,在规定的极端时间内,使容器压力急剧降低到大气压,纤维素的超分子结构被破坏,分子内断裂程度增强,天然植物纤维在基体中的分散性随之提高。小麦秸秆用蒸汽爆破处理后,秸秆大颗粒减少,纤维束增加;随着蒸汽温度的提高和处理时间的延长,纤维分布越均匀;处理后小麦秸秆纤维的酸缓冲能力大幅度降低,表面接触角变小,pH 降低,润湿性得到改

善,进而增强了复合材料的界面相容性^[8]。芦苇经蒸汽爆破处理后,其纤维素含量提高,酸不溶木素减少,综纤维素降低,半纤维素大量降解,细纤维含量显著增加,改善了纤维质量,制备的 WPC 拉伸强度和弯曲强度分别提高 22.3%和 32.6%^[9]。

微波处理使天然植物纤维内的水分迅速生热汽化,产生蒸汽压力,破坏纹孔膜等细胞的薄弱组织,提高纤维与塑料的界面连续性,增强两相相容性^[10]。天然植物纤维经微波处理后形成大量微隙与孔洞,比表面积显著增大^[11];秸秆纤维经微波处理,表面较粗糙,出现许多细小孔洞,处理前后秸秆纤维的表面形态差异较大,与塑料的界面结合力增强,相容性提高^[12]。近年来,微波处理在改善 WPC 界面相容性领域得到了广泛应用,由于其具有环保、高效等特点,越来越受到人们的重视。

此外,低温等离子体法^[13]、机械磨损处理方法^[14]、亚临界流体处理法^[15]、酶处理法^[16]等物理调控方法也被用于改善 WPC 界面相容性的研究。

1.1.2 化学调控

化学调控主要包括碱处理、酯化或醚化处理、表面接枝改性处理等方法。

碱处理是天然植物纤维表面改性较早、较常用的一种方法。这种方法可以溶解植物纤维中的部分果胶、木质素、半纤维素及其他低分子杂质,使纤维粗糙度增加,形成许多空腔,增强纤维与聚合物的界面粘合力,通常选择低浓度的碱液处理。采用质量浓度 5%的碱液处理纤维 2h,纤维素纤维的无定形区增加,结晶度减少,改善了纤维的润湿性和热稳定性,有利于纤维与树脂发生化学反应^[17];同时,碱液处理使纤维与树脂界面间的空隙尺寸减小,纤维素纤维中的羟基与碱液发生化学反应,形成共价键,增强了纤维与塑料基体的界面结合力,提高了复合材料的力学性能^[18-20]。

酯化或醚化处理是对天然植物纤维表面的羟基进行处理,使其生成疏水性非极性化学官能团,从而改善纤维和聚合物的界面相容性。

周亚巍等^[21]采用乙酸酐溶液对桦木粉进行酯化处理,通过热压制得高密度聚乙烯(HDPE)/桦木粉 WPC。研究发现,控制木纤维的酯化反应程度可以有效改善木纤维表面的疏水性,改变纤维形态和微观形貌,从而提高 WPC 的界面结合强度;木粉经酯化处理后,生成的乙酰基部分取代了纤维表面的羟基,降低了木纤维表面极性,而且木

纤维的长度和壁厚有所增加,提高了复合材料的力学强度。

表面接枝改性处理是在催化剂作用下,甲基丙烯酸甲酯、苯乙烯、马来酸酐、丙烯腈等单体产生游离自由基与天然植物纤维表面进行接枝共聚,改善纤维与塑料界面相容性。采用表面接枝甲基丙烯酸甲酯处理植物纤维,可以显著增强其与塑料基体的界面粘性^[22]。通过接枝苯乙烯对秸秆粉表面进行改性,可有效改善秸秆粉的表面极性,提高秸秆粉在塑料基体中的分散性,增强秸秆粉与聚合物复合时的界面融合性^[23]。

1.2 塑料基体表面改性

塑料基体存在表面能低、化学惰性及弱边界层等缺陷,对其表面进行处理,可以增加极性基团,改善结晶形态和表面形貌,提高塑料表面的润湿性,提高塑料与天然植物纤维的相容性,从而提高复合材料的物理性能。

采用马来酸酐对聚乙烯(PE)/聚丙烯(PP)共混物进行表面接枝改性,可有效地改善共混体系的相容性,同时增强共混物与天然植物纤维之间的界面结合力,显著提高复合材料的力学性能^[24]。研究发现,界面相容剂丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物接枝马来酸酐能有效提高 WPC 的界面相容性,增强材料的力学性能^[25]。甲基丙烯酸缩水甘油酯也常用于处理塑料基体表面,采用过氧化二异丙苯为引发剂,在木塑复合材料表面直接与塑料接枝,可省去合成高分子增溶剂,从而实现单体与 WPC 直接反应增容,降低生产成本^[26]。

1.3 添加改性剂

在 WPC 制备过程中,添加相容剂或偶联剂是常见的改善其界面结合强度的一种方法,同时可以起到增强复合材料性能的作用。

1.3.1 添加相容剂

相容剂可以增加界面层厚度,提高天然植物纤维在塑料基体中的分散性,增强纤维与塑料基体间的化学粘结,提高其界面相容性,进而提高复合材料的力学性能。常用的相容剂有马来酸酐接枝聚丙烯(MAH-g-PP)、亚甲基丁二酸酐、异氰酸酯等,其中以 MAH-g-PP 应用最为普遍。研究表明,添加 3% (wt, 质量分数,下同) MAH-g-PP 作为相容剂,制备的复合材料力学性能达到最佳^[27]。利用环氧丙烷和二氧化碳在戊二酸锌催化条件下处理聚碳酸亚丙酯和杨木粉,然后以其为原料采用马来酸酐接枝,

制备的木塑复合材料具有良好的热稳定性^[28]。边慧光等^[29]研究了 MAH-g-PP 及其用量对 WPC 性能的影响,发现当 MAH-g-PP 用量为 5 份时,WPC 的性能较好。曹金星等^[30]研究发现,在亚临界乙醇作用下,添加质量分数 10% 的 MAH-g-PP/木粉复合材料综合力学性能最佳,其两相界面结合较好。

1.3.2 添加偶联剂

偶联剂是一种具有 2 种不同性质(极性和非极性)官能团的物质,以化学键或强烈的物理作用(如大分子链的相互缠绕、选择性吸附等)分别与复合材料的不同相牢固结合,从而起到连接两相之间的桥梁作用。常用的偶联剂有硅烷偶联剂、钛酸酯偶联剂以及铝酸酯偶联剂等,其中以硅烷偶联剂应用最为广泛。

偶联剂不仅可以改善 WPC 的界面相容性,还可以提高 WPC 的性能。黄华尧等^[31]采用乙烯基三乙氧基硅烷对稻壳粉进行表面处理,在过氧化二苯甲酰引发剂作用下与 HDPE 混合,通过挤出制备了复合材料。研究发现,偶联剂的加入降低了材料熔体流动速率,乙烯基三乙氧基硅烷已经熔融接枝在 HDPE 分子上,改善了 WPC 各组分的分散性和相容性,提高了 WPC 力学性能。采用有机硅烷处理亚麻纤维后,其疏水性增加,提高了亚麻纤维与聚乳酸(PLA)塑料基体的相容性,制备的亚麻纤维/PLA 复合材料机械性能增强^[32]。

不同偶联剂对 WPC 的作用不同,袁杰等^[33]通过实验考察偶联剂对聚氯乙烯(PVC)/稻壳 WPC 力学特性和耐磨性的影响,发现 γ -氨丙基三乙氧基硅烷对复合材料力学特性和耐磨性的增强效果比较好,而钛酸酯不能提高复合材料的力学性能和耐磨性。毕永豹等^[34]研究发现,硅烷偶联剂的加入可以提高 PLA/麦秸粉复合材料的力学性能,其对冲击强度的作用效果强于弯曲强度;MAH-g-PP 相容剂的添加会使复合材料的弯曲强度与冲击强度先上升后下降,当相容剂含量为 1% 时,复合材料的弯曲强度与冲击强度达到最佳。与普通偶联剂相比,烷基烯酮二聚物偶联剂能更有效地增强天然植物纤维与塑料基体的界面相容性,能显著提升复合材料的拉伸强度和冲击强度,因此烷基烯酮二聚物是制备 WPC 非常有效的偶联剂^[35]。

此外,木质素胺^[36]、竹炭和壳聚糖^[37]等添加剂也被用于 WPC 的界面调控。

2 WPC 界面调控表征技术

WPC 界面调控表征技术包括化学结构表征技术和物理结构表征技术,下面主要介绍傅里叶红外光谱(FT-IR)分析、扫描电子显微镜(SEM)分析、透射电子显微镜(TEM)分析、X 射线光电子能谱(XPS)分析、动态热机械分析(DMA)、原子力显微镜(AFM)分析和纳米压痕技术等表征技术。

2.1 FT-IR 分析

FT-IR 是一种广泛用于 WPC 界面调控的表征技术。WPC 在加工成型过程中,通过界面调控后其表面的部分官能团可能会发生变化,采用 FT-IR 可以追踪界面物质官能团的变化情况,在分子水平上分析 WPC 的界面调控机理,从而指导制备工艺参数的优化。周亚巍等^[21]采用 FT-IR 分析了乙酸酐溶液酯化处理木粉与 HDPE 通过热压法制备的 WPC,发现酯化处理可以增加木纤维表面的疏水性基团,同时对纤维表面的羟基进行取代反应,降低纤维表面的极性,提高纤维与 HDPE 的界面相容性。常萧楠等^[37]通过添加竹炭和壳聚糖制备了竹炭和壳聚糖改性木粉/PVC WPC。FT-IR 分析表明,添加竹炭和壳聚糖使 WPC 中羟基、氨基和亚甲基等基团的吸收峰振动增强,使碳氯键的伸缩振动强度减弱,使碳、氯原子与周围原子的结合力增强,从而增强了木粉与 PVC 间的界面结合力。

2.2 SEM 及 TEM 分析

SEM 和 TEM 也是广泛用于 WPC 界面调控的表征技术,两者都可对复合材料表面形貌进行观察分析,对 WPC 界面调控具有重要的指导意义。葛正浩等^[38]采用马来酸酐接枝聚乳酸(MAPLA)、硅烷以及 2 种相容剂混合处理秸秆粉,利用注塑机制备了 PLA/聚丁二酸丁二醇酯(PBS)/秸秆粉可生物降解 WPC。通过 SEM 观察到分别添加 MAPLA、硅烷时,秸秆粉和塑料界面结合紧密,说明界面结合性能有一定的提高;同时添加 MAPLA 和硅烷时,塑料包裹着秸秆粉且分布均匀,WPC 断截面没有出现明显的界限,秸秆粉和塑料基体界面相容性得到显著改善。

TEM 可以透射电子穿透 WPC 内部,并与其中的化学成分发生相互作用,从而获得复合材料内部结构信息。赵永生等^[39]采用硅烷(YH-62)对木粉和插层蒙脱土(OMMT)进行表面改性,通过 TEM 观察 OMMT/硅烷改性木粉/PVC 复合材料的界面

情况,发现用 YH-62 改性的 OMMT 样品形成了部分插层纳米复合材料,但随着 OMMT 含量增加,蒙脱土粒子易发生团聚;形成的纳米级分散蒙脱土硅酸盐片层具有巨大的表面能效应,可与 PVC 有机组分紧密接触发生某种物理或化学作用,改善木粉与 PVC 及蒙脱土间的界面相容性;SEM 观察也进一步证实 YH-62 处理后,木粉与塑料基体相间缝隙不明显,改善了木粉与 PVC 的相容性和两相间界面强度。由于 TEM 要求样品非常薄,分析周期长,且成本远远高于 SEM,因此 WPC 界面调控的表征中 SEM 应用更多。

2.3 XPS 分析

WPC 各组分在加工制备过程中可能会发生化学键合。XPS 是一种表面分析方法,利用这种方法可以得到复合材料的化学状态、元素组成等大量的重要信息,在 WPC 的基础研究及实际应用中有非常重要的作用。Liu 等^[13]采用 XPS 研究了等离子体处理木纤维制备的 WPC 的界面情况,发现等离子体处理降低了复合材料表面的碳元素含量,而增加了复合材料表面氧元素的含量,进而增强了 WPC 的表面自由能;同时形成了很多羟基,这种极性基团有利于改善 WPC 的界面粘合性能。邸明伟等^[40]采用异氰酸酯对 PE WPC 进行表面涂覆处理,利用 XPS 对处理后 PE WPC 的表面性质进行了表征,发现异氰酸酯涂覆处理后,材料表面的氧元素含量相对增加,材料表面出现—OH、—C=O 和—O—C 等极性基团,且引入了异氰酸酯的—N=C=O 基团,显著改善了材料表面润湿与胶接性能。

2.4 DMA

DMA 是一种对复合材料进行测试和表征的方法,能够用于测试 WPC 的界面结合强度和动态力学性能。Schirp 等^[41]采用偶联剂 MAH-g-PP 处理木纤维和大麻纤维,与 PP 混合制备 WPC。使用 DMA 测试复合材料的动态力学性能,发现添加 MAH-g-PP 能明显提高复合材料的储存模量和损耗模量,这表明 WPC 中木质增强填料与塑料基体之间的界面结合得到改善。齐菁等^[42]采用 DMA 分析了马来酸酐接枝低密度聚乙烯(MAH-g-LDPE)偶联剂对木纤维/LDPE 复合材料动态力学性能的影响,发现添加 MAH-g-LDPE 提高了复合材料的存储模量,从而增强了纤维与塑料基体的界面粘合性。

2.5 AFM 及纳米压痕技术分析

AFM 能通过检测探针针尖对材料表面的原子力进行观察,是一种新型的表面结构分析仪器。AFM 本身具有纳米级的空间分辨能力,能在立体三维上观察材料表面特征。Liu 等^[13]采用等离子体处理木纤维,与 PE 混合制备了 WPC。AFM 观察发现,等离子体处理增加了纤维的粗糙度,进而提高了纤维与塑料基体的界面结合性能。

纳米压痕技术能够对复合材料的界面相进行高分辨率表征,有助于更好地理解复合材料之间的界面相,该表征技术操作方便、测量精度高,因而备受关注。Lee 等^[43]通过纳米压痕技术研究了 Lyocell 纤维增强 PP 复合材料的界面相,认为界面相的厚度小于 $1\mu\text{m}$,且界面相较牢固和均匀。

此外,接触角分析、体视显微镜分析、X 射线衍射分析、拉曼光谱分析以及核磁共振分析等分析技术也被用于 WPC 界面调控的表征。近年来,随着科学技术的飞速发展,复合材料界面表征技术也在不断进步,如在纳米压痕技术基础上发展的纳米动态力学分析(Nano-DMA)具有压入深度浅、测试速度快的独特优势,可得到空间分辨率高的力学性能分布图像,可实现 100nm 以上界面相的表征^[44];在 AFM 基础上发展的接触共振力调制显微镜^[45]和峰值力定量纳米力学成像技术^[46]具有纳米级空间分辨率,可实现几十纳米的界面相表征。

3 结语

WPC 是一种绿色环保、可持续发展的新型复合材料,受到了越来越多的关注,界面调控方法及其表征技术对提高 WPC 性能、拓宽 WPC 使用范围意义重大。然而,在 WPC 界面调控、WPC 界面表征技术等方面还存在诸多问题需要解决。

(1)低成本、高强度界面相容性调控方法。尽管上述物理和化学方法用于 WPC 界面调控,但低成本、易操作、相容性好的界面调控方法还需进一步强化。

(2)功能化 WPC 开发。由于 WPC 是环境友好型材料,在获得高强度复合界面的同时,应赋予 WPC 阻燃、抗菌、耐老化等功能,拓宽 WPC 的使用范围,延长 WPC 的使用寿命。

(3)可靠、先进的 WPC 界面表征技术。采用 FT-IR、SEM 和 DMA 等方法虽然可以获得 WPC 界面信息,但对于废弃木质纤维/废旧塑料复合材料

而言,原料的复杂性给界面表征增加了很大困难,因此应采用接触共振力调制显微镜、峰值力定量纳米力学成像技术等先进表征技术,提高界面信息准确度。

参考文献

- [1] 李坚.木材科学[M].第3版.北京:科学出版社,2014:402-409.
- [2] Kumar V, Tyagi L, Sinha S. Wood flour-reinforced plastic composites: a review[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2011, 27(5/6): 253-264.
- [3] Petinakis E, Yu L, Edward G, et al. Effect of matrix-partile interfacial adhesion on the mechanical properties of poly(lactic acid)/wood-flour micro-composites[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2009, 17(2): 83-94.
- [4] 霍中玲, 谢兆设, 陈猛. 木塑复合材料型材配方工艺研究[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(5): 33-35.
- [5] 鲁捷, 徐开蒙, 陈勇军, 等. 高温热处理杨木粉对木塑复合材料界面结合性能影响[J]. 林产工业, 2015, 42(8): 25-28.
- [6] Shebani A N, Reenen A J V, Meincken M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood-LLDPE composites[J]. Thermochimica Acta, 2009, 481(1): 52-56.
- [7] Hosseinaei O, Wang S, Enayati A A, et al. Effects of hemicellulose extraction on properties of wood flour and wood-plastic composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(4): 686-694.
- [8] Han G, Deng J, Zhang S, et al. Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw[J]. Industrial Crops & Products, 2010, 31(1): 28-33.
- [9] 韩士群, 杨莹, 周庆, 等. 蒸汽爆破对芦苇纤维及其木塑复合材料性能的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(1): 136-142.
- [10] 刘荣榕. PVC/木粉复合材料的制备及其性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [11] 未友国, 敖宁建, 张渊明. 植物纤维/蒙脱土/橡胶发泡复合材料微孔结构的研究[J]. 电子显微学报, 2008, 27(5): 379-383.
- [12] 邓华, 李淳, 曾秋苑, 等. 微波辐射下秸秆纤维微观结构的变化[J]. 分析测试学报, 2010, 29(4): 336-340.
- [13] Liu Y, Tao Y, Lv X, et al. Study on the surface properties of wood/polyethylene composites treated under plasma[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(3): 1112-1118.
- [14] Alam A K M M, Beg M D H, Prasad D M R, et al. Structures and performances of simultaneous ultrasound and alkali treated oil palm empty fruit bunch fiber reinforced poly(lactic acid) composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(11): 1921-1929.
- [15] 曹明浪, 张涛, 曹金星, 等. 亚临界流体挤出法制备高密度聚乙烯/木粉复合材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(3): 116-121.

- [16] 周亚巍, 宁莉萍, 王燕高, 等. 木聚糖酶处理对西南桦木/HDPE 复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 338-344.
- [17] Rojo E, Alonso M V, Domínguez J C, et al. Alkali treatment of viscose cellulosic fibers from eucalyptus wood: structural, morphological, and thermal analysis[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130(3): 2198-2204.
- [18] Rojo E, Oliet M, Alonso M V, et al. Mechanical and interfacial properties of phenolic composites reinforced with treated cellulose fibers[J]. Polymer Engineering & Science, 2014, 54(10): 2228-2238.
- [19] Fang L, Chang L, Guo W J, et al. Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood[J]. Applied Surface Science, 2014, 288(1): 682-689.
- [20] Islam M S, Hamdan S, Jusoh I, et al. The effect of alkali pretreatment on mechanical and morphological properties of tropical wood polymer composites[J]. Materials & Design, 2012, 33(1): 419-424.
- [21] 周亚巍, 宁莉萍, 杨永前, 等. 木粉的酯化处理对木塑复合材料性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(4): 572-576.
- [22] 钟鑫, 薛平, 丁筠. 改性木粉/PVC 复合材料的性能研究[J]. 中国塑料, 2004, 18(3): 62-66.
- [23] 王光照, 姜洪丽, 程文家. 秸秆粉的改性及其表面极性对木塑复合材料界面的影响[J]. 中国塑料, 2017, 31(3): 53-57.
- [24] 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, 2012, 43(1): 150-157.
- [25] 李伟浩, 刘超栋. ABS 木塑复合材料的制备与研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(12): 129-131.
- [26] 李跃文, 陈兴华, 欧阳杰, 等. GMA 和共单体对聚乙烯木塑复合材料的直接反应增容[J]. 高分子学报, 2012(6): 621-627.
- [27] Leu S Y, Yang T H, Lo S F, et al. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs) [J]. Construction & Building Materials, 2012, 29(7): 120-127.
- [28] Nörnberg B, Borchardt E, Luinstra G A, et al. Wood plastic composites from poly(propylene carbonate) and poplar wood flour-mechanical, thermal and morphological properties[J]. European Polymer Journal, 2014, 51(1): 167-176.
- [29] 边慧光, 胡纪全, 汪传生, 等. MAPP 对木塑复合材料性能的影响[J]. 弹性体, 2016, 26(4): 40-43.
- [30] 曹金星, 张玲, 张云灿, 等. 相容剂对 PP/木粉复合材料力学性能的影响[J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(2): 47-50.
- [31] 黄华尧, 吴书鹏, 刘畅, 等. 硅烷偶联剂对 PE-HD 基木塑复合材料力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2016, 30(7): 50-56.
- [32] Moigne N L, Longerey M, Taulemesse J M, et al. Study of the interface in natural fibres reinforced poly(lactic acid) biocomposites modified by optimized organosilane treatments[J]. Industrial Crops & Products, 2014, 52(1): 481-494.
- [33] 袁杰, 路琴, 唐健锋. GF 及偶联剂改性 PVC/稻壳木塑复合材料[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2): 42-45.
- [34] 毕永豹, 杨兆哲, 许民. 3D 打印 PLA/麦秸粉复合材料的力学性能优化[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4): 24-28.
- [35] Zhang H. Effect of a novel coupling agent, alkyl ketene dimer, on the mechanical properties of wood-plastic composites[J]. Materials & Design, 2014, 59(1): 130-134.
- [36] Yue X, Chen F, Mail X Z. Improved interfacial bonding of PVC/wood-flour composites by lignin amine modification[J]. Bioresources, 2011, 6(2): 2022-2034.
- [37] 常萧楠, 何春霞, 付菁菁, 等. 竹炭和壳聚糖对聚氯乙烯基木塑复合材料界面性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9): 2022-2029.
- [38] 葛正浩, 司丹鸽, 侯珊. 相容剂对 PLA/PBS/秸秆粉木塑复合材料性能的影响[J]. 塑料, 2017, 46(2): 77-79.
- [39] 赵永生, 王克俭, 朱复华, 等. 蒙脱土/硅烷改性木粉/PVC 复合材料[J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 63-71.
- [40] 邸明伟, 尤来, 赵婷玉, 等. 聚乙烯木塑复合材料的异氰酸酯表面处理与胶接[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 94-99.
- [41] Schirp A, Stender J. Properties of extruded wood-plastic composites based on refiner wood fibres (TMP fibres) and hemp fibres[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2010, 68(2): 219-231.
- [42] 齐菁, 于洪亮. 偶联剂对木纤维/LDPE 复合材料影响的动态力学热分析[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(5): 29-31.
- [43] Lee S H, Wang S, Pharr G M, et al. Evaluation of interphase properties in a cellulose fiber-reinforced polypropylene composite by nanoindentation and finite element analysis[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2007, 38(6): 1517-1524.
- [44] Gu Y, Li M, Wang J, et al. Characterization of the interphase in carbon fiber/polymer composites using a nanoscale dynamic mechanical imaging technique[J]. Carbon, 2010, 48(11): 3229-3235.
- [45] Nair S S, Wang S, Hurley D C. Nanoscale characterization of natural fibers and their composites using contact-resonance force microscopy[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2010, 41(5): 624-631.
- [46] Pakzad A, Simonsen J, Yassar R S. Gradient of nanomechanical properties in the interphase of cellulose nanocrystal composites[J]. Composites Science & Technology, 2012, 72(2): 314-319.

收稿日期: 2017-07-23

修稿日期: 2018-07-06