

胡玉安, 何梅, 宋伟, 等. 竹塑复合材料界面改性研究现状及展望[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(1): 114-123.



竹塑复合材料界面改性研究现状及展望

胡玉安^{1,2}, 何梅¹, 宋伟², 胡小霞², 陈政豪², 张双保^{2*}

(1. 江西省林业科学院 林产工业研究所, 江西 南昌 330032; 2. 北京林业大学, 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 竹塑复合材料(Bamboo-Plastic Composites, BPC)是木塑复合材料范畴内的新兴产品, 是一种绿色、可循环利用的环境友好型生物质复合材料。现阶段对竹纤维与塑料进行界面改性以提升材料性能是BPC研究领域的热点方向, 主要阐述了近年来竹塑复合材料界面改性研究的现状与进展。从纤维预处理改性、聚合物改性、助剂增容改性3个方面对国内外BPC界面改性研究现状进行了概述; 从性能评价手段、生产工艺、产品质量控制等方面归纳了BPC界面改性研究存在的不足; 同时从成本控制、界面改性机理探索、数学模型验证等角度对BPC界面改性的发展趋势进行了展望。

关键词: 竹塑复合材料; 界面改性; 相容性; 生产工艺

中图分类号: S784 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2019)01-0114-10

Research Status and Development Trend of Interfacial Modification of Bamboo-Plastic Composite

HU Yu-an^{1,2}, HE Mei¹, SONG Wei², HU Xiao-xia²,
CHEN Zheng-hao², ZHANG Shuang-bao^{2*}

(1. Jiangxi Academy of Forestry, Institute of Forest Products Industry, Nanchang 330032, China; 2. MOE Key Laboratory of Wooden Material Science and Application, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Bamboo-plastic composite is a new type of wood-plastic composites (WPC). It belongs to bio-composites which are non-toxic, recyclable and eco-friendly. Interface modification reinforced BPC is a hot research field both at home and abroad in recent years. In this paper, the current state of interfacial modification and the research results about BPC are summarized. The research on the surface treatment of bamboo fiber, the modification of plastics as well as the selection of processing additives of BPC at home and abroad is also discussed. The main issues about interfacial modification of BPC are summarized from the aspects of performance evaluation method, production technology and production quality control. Suggestions for the development of bamboo plastic composites are given from the perspective of manufacture cost control, interface modification mechanism and mathematical model verification.

收稿日期: 2018-04-21 **修回日期:** 2018-07-26

基金项目: 江西省科技厅重点研发项目(20171BBF60009)、国家自然科学基金项目(31670571)、北京市自然科学基金项目(6162019)和江西省博士后科研择优项目(2017KY20)

Project Supported by the Key Research and Development Project of Science and Technology Department of Jiangxi Province (20171BBF60009), National Natural Science Foundation of China (31670571), Beijing Natural Science Foundation (6162019) and Jiangxi Provincial Postdoctoral Science Advanced Foundation (2017KY20)

作者简介: 胡玉安(1981—), 男, 助理研究员, 博士/博士后, 主要从事木、竹基复合材料开发研究, 147477329@qq.com;

*通信作者: 张双保, 教授, 博士/博士后, shuangbaozhang@163.com。

Keywords: bamboo plastic composites; interface modification; compatibility; production technology

竹塑复合材料(Bamboo-Plastic Composites, BPC)是一种由竹纤维与聚合物基体复合而成的环境友好型材料,是以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)以及它们的共聚物等热塑性塑料与竹纤维或竹粉一起经熔融共混加工等方法成型制成的竹基纤维复合材料。作为生物质工程材料领域重要的新兴应用产品之一,它具有自身独有的特点和优势^[1-2]。

BPC是一种新型绿色代木材料,具有良好的尺寸稳定性、耐候性、力学性能。鉴于以上优点,BPC逐渐得到了从政府层面到设计师、生产商、再到消费者的一致认可,从20世纪90年代在北美开始产业化以来,21世纪初在国内开始逐渐出现BPC生产商与代理商,现如今,BPC产品已经大面积进入了中国普通老百姓的视野与生活^[3-5]。

中国作为竹材资源第一大国,可工业化利用的竹材产量与竹林面积均稳居世界首位。限于当前的加工水平,实际生产中以竹粉等形式产生的加工剩余物造成了巨大浪费,对生态环境造成沉重负担。与此同时,我国还长期遭受着严峻的废弃塑料污染压力,结合废弃物资源化利用领域与竹材、塑料复合用于工程领域的“竹塑复合材料”产品,为科学发挥竹资源优势(储量大、可再生、高性能、低成本)、缓解木质工业材短缺、调控“白色污染”开辟了新思路,同时也是农林废弃物资源化、节约化、无害化及循环利用领域的重点研究内容。

目前,国内关于竹塑复合材料的研究很多,重点集中在性能改性与生产工艺改进方向,改善竹材与塑料的界面相容性研究是竹塑复合材料研究领域的热点方向之一。如果复合材料中竹纤维的施加量较大,纤维与塑料界面间的相容性就比较差,对复合材料的性能会产生负面影响^[6];此外,竹纤维之间由于氢键作用会产生分子间作用力,影响纤维在聚合物基体复合材料体系内的分散^[7]。因此,如何对竹纤维与塑料聚合物基体进行改性研究,提高界面胶粘效应,成为制备性能良好的BPC需面临的首要问题。

1 竹塑复合材料界面改性研究现状

BPC的界面改性问题,国内外很多专家学者已经进行了探索性研究,以前所提出的界面增强及改性技术,如马来酸酐接枝聚丙烯偶联剂(MAPP)、异氰酸酯、硅烷偶联剂改性等,在不同的复合材料体系中得到了实践验证。新的技术也在不断开发中,如微孔发泡改性,超/亚临界流体萃取、挤出改性、筋条界面增强改性等^[8]。通常,BPC界面改性主要有以下3种方法:1.纤维预处理改性,减少其极性基团;2.聚合物基体改性,改变表面化学组成,提高塑料极性;3.添加助剂改性,改善界面的相容性。

1.1 纤维预处理改性

竹纤维是一种极性材料,与塑料等非极性材料复合共混,两者很难产生化学键连接。改善BPC的界面相容性,解决好竹质材料在树脂基体中的分散性是提高BPC性能的关键技术,也是目前界面改性研究的重点和难点。

纤维预处理的目的是利用材料自身优势,遏制其缺陷。改变纤维理化性质是提升相容性与力学性能的手段。主要包括改造纤维的表面形貌、表面自由能、比表面积、表面粗糙度等手段^[9-12]。纤维理化改性的目的是降低表面极性以及增加纤维表面粗糙度,主要方向包括:(1)通过改性去除竹纤维中的半纤维素类等杂质成分,减少吸水基团,增强植物纤维的稳定性;减弱界面排斥,消除表面氢键作用,得到牢固的结合界面。(2)通过改性,去除竹纤维的极性,在纤维表面生成非极性基团,改善提高高聚物与竹纤维之间的相容性。

竹纤维表面改性的具体手段有很多,如涂层法、氧化法、超声波处理、等离子体处理法、气相沉积法等^[13-16],目前,采用化学方法实现竹纤维与高聚物的共聚、接枝、交联技术比较成熟。熊小艺等^[17]创新性的采用微生物改性竹纤维,探讨微生物对纤维结构成分的影响。微生物改性去除了竹纤维内木质素与半纤维素成分,降低竹纤维极性,界面浸润性提升。王翠翠等^[18]研究了CaCO₃原位沉积对竹、木、麻纤维的表面改性情况,压制了纤维增强聚丙烯BPC,并通过电镜、纤维接触角测量仪、原子力学显微镜分析纤维的形貌、接触角、粗糙度及材料断口形态,实验发现CaCO₃原位沉积提高了纤维的力学性能,改善了界

面性能,增强了界面强度。王翠翠等^[19]对纳米浸渍竹纤维施加超声波处理,研究超声频率和超声时间对纤维力学性能的影响。采用场发射电镜和激光共聚焦显微镜对超声处理后的纤维 CaCO_3 附着量及形貌进行观察,研究发现:竹纤维的弹性模量和拉伸强度得到有效提高。

Hung 等^[20]研究乙酰化处理后的竹纤维性能,研究表明:纤维与高密度聚乙烯(HDPE)复合材料在经过自然老化后,力学性能保留率提高,还发现乙酰化处理后纤维增重率与改善程度呈正相关。周钢等^[21]采用马来酸酐作为相容剂处理竹纤维表面,制备 BPC;研究发现随 EVA 的添加,纤维的极性显著降低,纤维与聚合物基体间的相容性得到充分改善。余方兵等^[22]对竹粉纤维表面接枝 PMMA 进行了研究,考察了竹粉改性对 BPC 动态热力学性能的影响,研究表明竹粉与 PETG 基体之间的相容性得到了有效改善。王春红等^[23]采用碱偶联剂处理竹纤维,制备竹纤维与聚丙烯混杂毡材料,利用电镜观察界面结合效果,探讨了改性前后材料的吸湿老化情况,发现材料的吸湿情况符合 Fick 定律,且不受纤维添加量影响,经过碱偶联剂处理后的复合材料耐老化性能提升显著。

林金娜等^[24]探讨了竹纤维用量对 BPC 土工网的力学及热学性能影响,发现随纤维含量增加,BPC 的热变形温度及拉伸、冲击、弯曲强度有效提高,熔体流动速率与断裂伸长率下降。采用主成分分析法确定竹纤维最佳含量为 27%,10% 玻璃纤维与 27% 竹纤维和混合 BPC 土工网拉伸强度、伸长率最优。任兵杰等^[25]研究了可应用于竹粉液化的热化学酚化技术,结果发现接枝改性后的竹纤维与高密度聚乙烯成型制备的 BPC 具有更优的力学性能与尺寸稳定性。何文等^[26]以 HDPE 与竹粉为原料,采用混炼、热压方法制备 BPC,研究竹粉含量和粒径大小对材料的吸湿、吸水性影响。结果显示 BPC 的吸湿、吸水性能随竹粉添加量提高而逐渐提升,竹粉粒径减小时,材料吸湿吸水性得到有效改善。赵娟等^[27]利用 PP-g-MAH 改性竹粉制造的 BPC 性能情况,研究发现 PP-g-MAH 可有效提升界面之间的相容性,增强了高聚物与竹粉的界面粘合力,改善了材料的性能。Karen 等^[28]利用扫描电镜-X 射线能谱仪观察硅烷偶联剂在纤维上的分布。研究利用动态流变学技术获得材料内部黏弹信息,对探索内部复杂缠结构及指导 BPC 实际生产具有重要意义。Ibach 等^[29-32]的研究表明,材料表面的表面张力可以通过纤维改性来提高,表面改性还可以改善材料的吸湿性和可降解性。

纤维预处理改性目的是使竹纤维与聚合物基体表面的极性与润湿性相近,进而在板材压制过程中两种材料界面间形成分子级别的交联,改善材料之间的粘接性能。竹纤维界面改性主要采用对极性官能团进行醚化、酯化、接枝共聚等改性处理的方法,然后生成疏水的非极性化学官能团并具有良好的热流动性,使竹纤维的表面与聚合物表面的极性与溶解度接近,降低竹纤维与聚合物基材表面间的排斥性,最终取得改善界面间粘合性的目的。

1.2 聚合物基体改性

目前,制备 BPC 的聚合物包括 PP、PE、HDPE、PVC、PS 等。聚合物基体表面疏水性良好,表面能低。若能通过手段提升表面能,即可与纤维均匀混合,可通过一些预处理方法提高基体的润湿性,如酸处理法、光化学处理法及辐射处理法等^[33]。对聚合物基体进行改性是提高 BPC 界面相容性的重要方法。聚合物表面改性包括在聚合物后加工工程中混入偶联剂与合成过程中引入极性基团等方法,聚合物基体改性后极性增加,与纤维表面羟基分子间力作用增强,相容性改善,各项性能指标提高。如马来酸酐接枝聚合物基团可增加极性基团数量,可有效改善界面性能。这种改性方法由于容易出现实验失败,故应用较少,聚合物在后期加工过程中加入偶联剂方法是目前主流的聚合物改性方法,运用更为广泛。

姜瑜等^[34]以 HDPE 与竹屑为内层材料,HDPE、HDPE 与白泥、竹浆纤维、纳米 CaCO_3 等不同组合成为表面层材料,共混挤出制备内外层结构 BPC,研究内外层结构 BPC 的热解程度受温度升高速率的影响,并采用 Coats-Redfern model 及 Flynn-Wall-Ozawa model 量化内外层结构 BPC 表观活化能。研究发现表面层聚合物混入纳米 CaCO_3 与白泥的内外层结构 BPC 热稳定性得到有效增强,BPC 热稳定性受竹浆纤维的添加影响较小;在表面层中添加 10% 聚合物基体改性剂的 BPC 表观活化能变化不明显。郑峰等^[35]为提高稀土荧光 BPC 的尺寸稳定性,拓展材料应用领域,采用氢硅油改性铝酸锶荧光粉与竹粉混合界面,共混注塑制备稀土荧光 BPC。通过接触角法、SEM、荧光分光光度计等分析手段探讨 BPC 润湿性、吸水性、发光性等性能受含氢硅油添加的影响。研究表明:改性 BPC 表面疏水性增强,尺寸稳定性得到改

善。经水浸实验得知:改性 BPC 的相对发光强度下降程度低于未改性 BPC, SEM 观察显示:氢硅油改性后荧光粉和竹粉在聚合物基体中分散均匀、界面黏合强度提升,游离羟基数量降低。

漆楚生等^[36]为制备尺寸稳定性好的复合材料,以 HDPE 与植物纤维制备复合刨花板,并探索 HDPE 投加量与界面分布对刨花板性能的影响,结果表明:刨花板的各项力学强度随 HDPE 含量的增大而提升。塑料含量对性能影响存在峰值,HDPE 投加越多,刨花板的尺寸稳定性越好。王汝敏等^[37]研究用 MA 接枝改性 PE,将 MA 上极性基团接枝到 PE 分子链上,提高基体极性,改善相容性,这种方法存在的问题是接枝率低,工艺苛刻、成本高。

Adhikary 等^[38]研究回收的 HDPE 与植物纤维共混制备的复合材料力学性能,结果发现采用回收 HDPE 制备的材料性能优于纯 HDPE 制备的材料性能,但具体原因尚不明确。Lee 等^[39]对比了 4 种纯塑料的弯曲强度,结果为 PP>PS>HDPE>LDPE,研究还利用衰减全反射光谱表征纤维在聚合物中的分散性,实验发现 PS 聚合物分散性最差。葛正浩等^[40]将 PP 与 HDP 塑料共混制备 BPC,探索力学性能及微观结构变化,结果显示 BPC 的拉伸强度比木塑复合材料(WPC)更优,加入一定量 HDPE 可以提高 PP/竹粉材料的力学强度,竹粉与塑料的相容性比木粉好。

聚合物基体表面经过改性后具有大量极性基团,竹纤维表面的羟基会因为极性相近与聚合物间出现分子间作用力增强的现象,即相容性获得改善,复合材料的物理力学性能提升。目前聚合物基体改性的最主流方法还是接枝共聚处理。虽然聚合物基体改性可以明显改善界面间的相容性,但这种改性手段的过程复杂。更具有操作性的手段是采用预处理对聚合物进行增容改性,通过制备大分子增容剂,加入到聚合物基体中,最后制成复合材料。

1.3 助剂改性法

添加相容剂可以改善 BPC 的界面相容性。偶联剂是具有双功能基团的特殊物质,偶联剂的亲、疏水基可起到桥梁作用来改善 BPC 的界面相容性^[41-42]。相容剂可以降低聚合物间的表面张力,增加界面层的厚度与聚合物间粘结力,改善材料热稳定性,增加应力传递效率,降低分散体粒径,形成稳定结构,促使材料的性能均一稳定。

偶联剂的主要目的是起到促使竹纤维和塑料间结合的作用,促进纤维均匀分散,促使纤维聚合物间形成稳定键结构。偶联剂有异氰酸酯、硅烷偶联剂、壳聚糖、马来酸酐接枝聚合物、乙烯丙烯酸酯等^[43-45]。马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)是一种用来改性塑料界面相容性的常用增容剂,作为一种高效增容剂,MAPE 一端的羧基五元环活跃,易与纤维上羟基反应生成稳定酯键,酯化反应过程如图 1 所示。

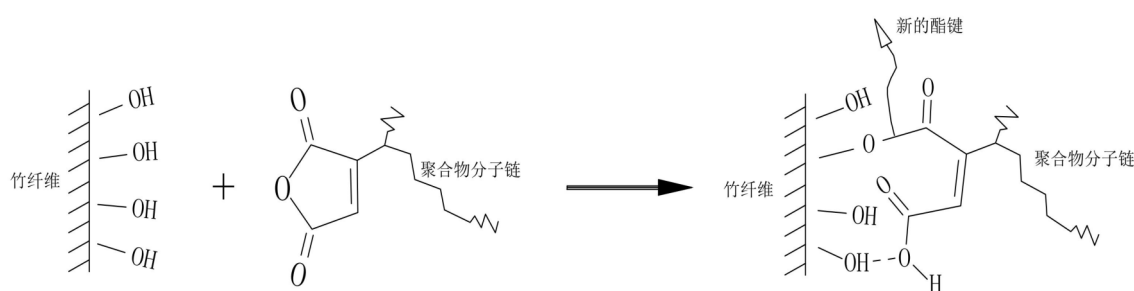


图 1 MAPE 复合 BF 反应机理

Fig.1 Mechanism of MA grafting onto PE for bamboo fiber

徐建锋等^[46]研究了 MAPP、MAPE、超分散包覆剂 YB-510 这些偶联剂对 BPC 界面及热稳定性的影响,利用 ESEM 观察断面微观形貌,利用 TG-DTA 分析纯竹粉、LDPE 与加入偶联剂后的 BPC 的 TG 曲线和 DTG 曲线,结果显示 3 种偶联剂帮助竹粉均匀分散在 LDPE 基体中,MAPE 提高 BPC 的热稳定性,MAPP 对热稳定性影响不显著,YB-510 对 BPC 热稳定性有负面影响。陈钦慧等^[47]利用铝酸酯作为偶联剂,采用聚己内酯与竹纤维制备 BPC,利用 IR、XRD 分析偶联剂与竹粉的作用机理,利用转矩流变仪和 DSC 考察偶联剂对界面相容性影响。研究发现:高速搅拌和偶联剂使得纤维结构破坏,实验还给出达到最佳力学性能时偶联剂的适合添加量。

玉澜等^[48]用球磨机预处理竹粉,采用改性竹粉与PVC制备BPC,研究机械活化的硅烷偶联剂与材料性能关系,采用XRD、FTIR、SEM进行表征,研究发现:机械活化改性降低纤维结晶度,提高反应活性,界面相容性改善,竹粉/PVC强度提升。姚雪霞等^[49]利用壳聚糖改性竹粉/PVC复合材料,实验研究了壳聚糖投加量与材料耐水、物理力学及防腐性能的关系,结果发现:壳聚糖起到了改善材料性能作用。与未处理材料相比,各项性能都得到显著改善。郑峰等^[50]研究PE-g-MAH影响稀土荧光BPC发光与力学性能情况。研究利用红外光谱仪与荧光光度计获得红外与发射光谱图谱,利用FESEM场发射电镜获得材料断面微观形态。研究认为:随PE-g-MAH含量增加,BPC发光及力学强度先增后减。FTIR图谱结果显示:竹粉、铝酸锶荧光粉表面羟基与PE-g-MAH发生酯化反应,形成氢键。电镜结果显示:随PE-g-MAH含量增加,荧光粉在聚合物基体中团聚少、分散均、界面结合好。

苏国基等^[51]为改善竹粉聚丙烯材料防霉性能,选取硅烷偶联剂改性纳米ZnO压制BPC,研究硅烷改性ZnO对材料的防霉、微观结构的影响。研究发现:改性剂加入抑制霉菌生长,随改性剂投加量的提升,防霉性能极大改善,改性剂最佳用量为竹粉质量的3%,电镜结果发现改性剂限制了霉变对材料形貌的影响,霉变裂纹减少。周吓星等^[52]研究钛酸酯偶联剂对发泡BPC物理力学、热学和流变性能影响,采用扫描电镜观察材料界面微观结构后发现:加入钛酸酯提高了发泡BPC的力学与耐水性,钛酸酯的最佳用量为2%,材料各项力学性能与耐水性提高,利用频率扫描技术发现改性BPC复数黏度及储能模量下降,流变性、均相性增强。热重分析发现,改性BPC热稳定性提高,电镜观察表明改性BPC界面相容性提高。何文等^[53]以HDPE、竹纤维(BF)为原料,MAH-g-PP作为偶联剂,共混、平板热压制备HDPE/BF复合材料,探讨HDPE/BF复合材料亲水性、力学强度受MAH-g-PP加入量(0、2%、5%、8%)的影响。发现MAH-g-PP可有效改善HDPE/BF材料的吸湿性及力学性能。MAH-g-PP加入量为5%时BPC的吸水、吸湿率最低,力学强度最好。FTIR分析表明,MAH-g-PP加入后导致BF的游离羟基与MAH发生酯化反应。

常用于改善BPC界面相容性的助剂主要有以下几类:(1)相容剂助剂改性。以马来酸酐接枝聚烯烃为主,包括MAPP、MAPE等,竹纤维中羟基数目由于与马来酸酐端含有的羧、酐基发生酯化反应而减少,接枝物末端的聚合物链还会与塑料基体出现晶格间缠结现象,从而改善材料的尺寸稳定性与力学性能。(2)偶联剂助剂改性法。包括钛酸酯、异氰酸酯、硅烷等,偶联剂通过浸渍、喷抹、共混等方法与聚合物基体分子发生作用,包覆于竹纤维表面,通过酯化形成键合作用,提高界面粘合效果。(3)表面活性剂助剂改性法。包括油酸、硬脂酸等,天然油脂可以有效提升竹纤维与基体间界面粘接性,改善材料的热稳定性。

2 竹塑复合材料界面改性研究存在的不足

2.1 性能评价手段的可靠性问题

目前有很多分析测试手段用于评价纤维聚合物复合材料界面性能,利用这些测试手段能否真正达到预期目的,有待深入探讨。如何确定测试手段的有效性和准确性非常重要。通常来说,材料的宏观性能失效与界面的微观结构与化学性质改变密切相关^[41]。目前并没有一种理论能清楚地解释界面性质改变在材料失效过程中的确切作用,也没有一种通用方法来进行改性后纤维与聚合物基体粘接效果提升对材料性能的影响评价。常见的性能改善方法主要还是依靠经验模型来进行。

2.2 偶联剂用量的确定问题

偶联剂的使用量是影响界面改性效果的重要因素,如果用量太少,对提升材料的界面相容性效果有限;如果用量太多,在偶联剂的分子层上会形成一层界面隔层,隔层将严重影响材料的物理力学性能。有实验结果表明,使用异氰酸酯和钛酸酯偶联剂时,一般在每100 g基体树脂内加1 mL改性偶联剂时,材料能获得最佳综合性能;如果偶联剂用量过多,高温条件下易发生化学反应,导致体系流动性降低,不利于节约加工能耗和成本^[54]。

2.3 成型工艺对BPC界面改性的影响问题

竹纤维的填充量影响界面的黏度与流动性,最终可能会影响产品的表面质量与美观,对木工机械也会造成磨损与负担,将会成为制约BPC规模化生产的因素。一些界面改性剂可以有效改善材料的流动性,如PE-g-MAH是一种良好的复合材料内润滑剂,如果再加入硬脂酸盐后,两种改性剂还具有良好的协同润滑作用,可共同促进聚合物材料界面层的形成。

2.4 紫外光老化与耐候性问题

紫外光老化主要发生在一定厚度的复合材料表层上,材料的表面首先老化,形成屏蔽层阻碍材料内层老化。在紫外老化过程中,纤维的羰基充当发色基团,即老化引发剂,加速聚合物的老化,导致表面褪色,故界面纤维的填充量越高,其老化过程越剧烈^[55]。材料的耐候性同样与纤维填充量有关。纤维量越大,材料吸湿性强,耐候性差。如何有效利用材料界面改性提高竹纤维在聚合物中的分散性,降低竹纤维吸水率,进而改善其耐候性与耐老化性是界面改性研究领域亟待解决的一个重要问题^[56]。

3 竹塑复合材料界面改性研究的发展趋势

界面改性及纤维增强是目前BPC研究的热门方向。改性研究结果能否落实应用还有待实践验证,应主动放弃一些反应条件苛刻、改性效果一般、成本昂贵的研究工作。目前BPC界面改性研究的热点方向包括:

(1)绿色环保、制备工艺简单的偶联剂有待开发、应用于BPC产品,若能有效降低BPC产品生产成本,且保证BPC产品的性能优异,该类偶联剂产品会迅速占领市场。

(2)界面改性剂作用机理值得进一步探讨研究。改善分析测试方法,测得有实际意义的数据与参数,对研究界面理化及微观变化与材料性能之间的关系具有重要意义。

(3)针对材料应用领域建立合理可靠的数学模型,并进一步建立可与实验测试数据相验证的数学模型,探讨微观结构和宏观性能之间的联系,研究界面改性对复合材料性能失效的影响,不断完善生产工艺条件,开发出性能优异的BPC产品。

4 小 结

本文介绍了目前国内外BPC界面改性研究的现状,并对目前国内外主流研究方法与发展趋势进行了归纳与展望。界面改性问题是制约聚合物基纤维复合材料产品市场空间拓展的关键问题,全面、准确、系统、前瞻性地对这一问题进行深入归纳与探讨,可以促使该方向基础理论研究工作更具有目的性,促使BPC材料的产品性能更加优越,应用的市场空间更加广阔。

参考文献:

- [1] 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 woodplastic composites for furniture production: possibilities and opportunities[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(3): 1-8.
- [2] 钱晨,杨斌,夏茹,等.木塑复合材料界面改性研究进展[J].塑料工业,2013,41(5):16-19.
Qian C, Yang B, Xia R, et al. Research progress of interface modification of wood plastic composites[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(5): 16-19.
- [3] 张露,周爱萍,盛宝璐,等.碳纤维复合材料加固带缺陷木梁的试验研究[J].林业工程学报,2018,3(3):128-135.
Zhang L, Zhou A P, Sheng B L, et al. Study on carbon fiber reinforced polymer reinforced timber beams with defects[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(3): 128-135.
- [4] 赵德金,郭艳玲,宋文龙.国内外竹塑复合材料研究进展[J].安徽农业科学,2014,42(21):7059-7060.
Zhao D J, Guo Y L, Song W L. Research advance of bamboo plastic composites at home and abroad[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(21): 7059-7060.

- [5] 方露,王雪花,熊先青,等.单板表面预处理对木塑复合胶合板耐湿循环能力的影响[J].林业工程学报,2016,1(1):37-41.
Fang L, Wang X H, Xiong X Q, et al. Effects of surface pretreatments on wet cycle resistance of wood-plastic plywood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(1): 37-41.
- [6] 李正印,王伟宏.高木材纤维含量聚丙烯基复合材料的制备及其性能[J].林业工程学报,2017,2(2):9-15.
Li Z Y, Wang W H. Preparation and properties of polypropylene based composites with high wood fibers content[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(2): 9-15.
- [7] 刘玉桂,任元林,董二莹,等.木塑复合材料界面相容性及加工工艺研究进展[J].天津工业大学学报,2011,30(6):15-19.
Liu Y G, Ren Y L, Dong E Y, et al. Research progress of interface compatibility and processing of WPC[J]. Journal of tianjin polytechnic university, 2011, 30(6): 15-19.
- [8] 曹金星,张玲,张云灿.木塑复合材料界面改性方法研究进展[J].高分子材料科学与工程,2016,32(8):171-176.
Cao J X, Zhang L, Zhang Y C. Advances in interfacial modification methods of wood plastic composites[J]. Polymer materials science and engineering, 2016, 32(8): 171-176.
- [9] 巫其荣,关鑫,林金国,等.冷等离子体处理工艺对竹材表面润湿性的影响[J].江西农业大学学报,2017,39(3):535-539.
Wu Q R, Guan X, Lin J G, et al. Effect of cold plasma treatment on the surface wettability of bamboo[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 535-539.
- [10] 贺磊,黄慧,王玉,等.浸胶工艺对竹材加工剩余物制备重组复合板性能影响的研究[J].江西农业大学学报,2010,32(4):778-782.
He L, Huang H, Wang Y, et al. Influence of dipping process on the performance of recombined composite plate prepared with bamboo surplus[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010, 32(4): 778-782.
- [11] 黄润州,梅长彤,徐信武,等.皮层对皮-芯结构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(5):135-140.
Huang R Z, Mei C T, Xu X W, et al. Effect of shell on core-shell structure wood polymer composite with short glass fiber filled shells via co-extrusion technology[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(5): 135-140.
- [12] 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.
Han S Q, Yang Y, Zhou Q, et al. Effects of steam explosion on reeds fiber and the properties of reed wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(1): 136-142.
- [13] 魏强,高志鹏,郭琳,等.平安竹纤维形态变异特征及其成因分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(4):25-31.
Wei Q, Gao Z P, Guo L, et al. Characterization of fiber morphological variation of *Pseudosasa japonica* var. *tsutsumiana* and the underlying mechanism[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(4): 25-31.
- [14] 郑安呐,吴叙勤,李世缙.碳纤维表面及其复合材料界面优化的研究 VI.碳纤维复合材料的界面结合[J].华东理工大学学报,1994,20(4):485-491.
Zhen A N, Wu X Q, Li S J. Studies on the surface treatment of the carbon fiber and optimization of its composite interface VI. study on the interface bonding of the composites reinforced by the carbon fibers[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1994, 20(4): 485-491.
- [15] 张志威,关明杰,刘源松.竹笋壳/脲醛树脂改性淀粉胶黏剂复合材料的降解特性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):160-166.
Zhang Z W, Guan M J, Liu Y S. Degradability of bamboo shoot shell/UF modified starch adhesive composites[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(4): 160-166.
- [16] 陈平,于祺,孙明,等.高性能热塑性树脂基复合材料的研究进展[J].纤维复合材料,2005,32(4):52-57.
Chen P, Yu Q, Sun M, et al. Advances in high performance FRTP composites[J]. Fiber Composites, 2005, 32(4): 52-57.

- [17] 熊小艺,于辉,郑遗凡,等.竹纤维微生物改性对竹塑复合材料性能的影响[J].塑料,2017,46(1):1-4.
Xiong X Y, Yu H, Zheng Y F, et al. Effect of microbial modification on properties of bamboo fibers reinforced polypropylene composites[J]. Plastics, 2017, 46(1): 1-4.
- [18] 王翠翠,张双保,羡瑜,等.碳酸钙原位改性植物纤维及其复合材料性能表征[J].北京林业大学学报,2016,38(3):95-101.
Wang C C, Zhang S B, Xian Y, et al. Properties of plant fibers and their composites modified in situ with calcium carbonate[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 95-101.
- [19] 王翠翠,程海涛,宋伟,等.超声处理对纳米改性竹纤维力学性能的影响[J].纺织学报,2016,37(3):16-20.
Wang C C, Cheng H T, Song W. Influence of ultrasonic treatment on mechanical properties of bamboo fibers modified by nanoparticles[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(3): 16-20.
- [20] Hung K C, Chen Y L, Wu J H. Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(9): 1680-1685.
- [21] 周钢,喻云水,吴庆定,等.竹粉/高密度聚乙烯复合材料性能研究[J].中南林业科技大学学报,2012,32(1):113-116.
Zhou G, Yu Y S, Wu Q D, et al. Study on the performance of bamboo powder and HDPE composites [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(1): 113-116.
- [22] 余方兵,宋剑巧.竹粉接枝改性提巧竹塑复合材料的力学性能[J].农业工程学报,2013,29(23):81-89.
Yu F B, Song J Q. Bamboo flour modifying by grafted improves mechanical property of bamboo-plastic composites [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 81-89.
- [23] 王春红,刘胜凯,任子龙,等.表面改性对竹纤维与聚丙烯纤维混杂毡平铺复合材料湿热老化影响[J].塑料,2016,45(4):50-54.
Wang C H, Liu S K, Ren Z L, et al. Effect of surface modification on hygrothermal ageing behavior of bamboo fiber and polypropylene fiber hybrid composite [J]. Plastics, 2016, 45(4): 50-54.
- [24] 林金娜,邱仁辉,陈礼辉,等.竹塑复合材料及其在土工网中的应用[J].东北林业大学学报,2004,32(5):32-34.
Lin J N, Qiu R H, Chen L H, et al. Bamboo fiber reinforced thermoplastic composite and its application to geotextile [J]. Journal of northeast forestry university, 2004, 32(5): 32-34.
- [25] 任兵杰,陈宇翔,方红霞,等.马来酸酐接枝改性竹纤维及其增强复合材料的性能[J].工程塑料应用,2011,39(5):16-19.
Ren B J, Chen Y X, Fang H X, et al. Grafting modification of bamboo cellulose fibre and its composite properties [J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(5): 16-19.
- [26] 何文,陈雯丽,陈佳,等.竹粉含量及粒径对竹塑复合材料性能的影响[J].林业科技开发,2014,28(3):86-89.
He W, Chen W L, Chen J, et al. Effects of content and size of bamboo flour on properties of bamboo-HDPE composite [J]. China Forestry Science and Technology, 2014, 28(3): 86-89.
- [27] 赵娟,崔怡,李丙海.木质填料种类及含量对木塑复合材料性能的影响[J].塑料科技,2007,35(9):46-52.
Zhao J, Chui Y, Li B H. Study on the polyolefin-based wood-plastic composites [J]. Plastics Science and Technology, 2007, 35(9): 46-52.
- [28] Karen T L, Brian K N, John A L. Modification of kraft wood pulp fiber with silica for surface functionalization [J]. Composites: Part A, 2008, 39(12): 1815-1821.
- [29] Ibach R E, Clemons C M, Schumann R L. Wood-plastic composites with reduced moisture: Effects of chemical modification on durability in the laboratory and field [C]. Ninth International Conference on Wood and Biofiber Plastic Composites, 2007, 259-266.
- [30] Ebrane M, Sebe G, Cullis I, et al. Photostabilisation of wood using aromatic vinyl esters [J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94 (2): 151-157.
- [31] Rowell R M. Property enhanced natural fiber composite materials based on chemical modification [M]. New York: Plenum Press, 1998, 717-732.
- [32] Stefke B, Windeisen E, Schwanninger M. Determination of the weight percentage gain and of the acetyl group content of acetylated wood by means of different infrared spectroscopic methods [J]. Analytical Chemistry, 2008, 80(4): 1272-1279.

- [33] 王清文, 欧荣贤. 木质纤维材料的热塑性改性与塑性加工研究进展[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 133-142.
Wang Q W, Ou R X. Progress in thermoplasticization and plasticity-processing of lignocellulosic materials[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(6): 133-142.
- [34] 羡瑜, 李海栋, 王翠翠, 等. 壳层组分对芯壳结构竹塑复合材料热解特性的影响[J]. 中国塑料, 2018, 32(1): 51-58.
Xian Y, Li H D, Wang C C, et al. Effect of shell composition on pyrolysis kinetics characteristics of core-shell structured bamboo plastic composites[J]. China Plastics, 2018, 32(1): 51-58.
- [35] 郑峰, 王艳姗, 丁大彬, 等. 含氢硅油改性稀土荧光竹塑复合材料的耐水性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 308-314.
Zhen F, Wang Y S, Ding D B, et al. Water resistance of rare earth fluorescent bamboo plastic composites modified with hydrogen silicone oil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 308-314.
- [36] 漆楚生, 李恺琳, 赵博识, 等. 塑料含量和分布对定向木塑复合刨花板性能的影响[J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 39-44.
Qi S S, Li K L, Zhao B S, et al. Effects of high density polyethylene content and distribution on properties[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(6): 39-44.
- [37] 王汝敏, 郑水蓉, 郑亚萍. 聚合物复合材料及工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 139-171.
Wang R M, Zheng S R, Zheng Y P. Polymer matrix composites and production technology[M]. Beijing: Science Press, 2004: 139-171.
- [38] Adhikary K B, Pang S, Staiger M P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(5): 807-815.
- [39] Lee C H, Wu T L, Chen Y L, et al. Characteristics and discrimination of five types of wood-plastic composites by FTIR spectroscopy combined with principal component analysis [J]. Holzforschung, 2010, 64(6): 699-704.
- [40] 葛正浩, 元庆凯, 田普建, 等. 聚丙烯/高密度聚乙烯混炼对竹木塑复合材料性能的影响[J]. 塑料, 2011, 40(1): 43-45.
Ge Z H, Yuan Q K, Tian P J, et al. The effect of PP/HDPE mixing on properties of bamboo/wood-plastic composite[J]. Plastics, 2011, 40(1): 43-45.
- [41] 郭明波, 古宏晨. 纤维增强聚合物基复合材料界面问题的研究现状与前景[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 60-62.
Guo M B, Gu H C. Present status and foreground of research on inter phase issues of fiber reinforced polymer-matrix composites[J]. Materials Review, 2005, 19(2): 60-62.
- [42] Alireza A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4661-4667.
- [43] Zhou J A, Sheng J S, Wang Y H, et al. Interface research of wood/plastic composites modified by long chain segment b graft [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(S2): 390-393.
- [44] Lu F, Liang C, 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.
- [45] Araujo J R, Waldman W R, Depaoli M A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(10): 1770-1775.
- [46] 徐建锋, 曾春霞, 杨文斌. 偶联剂对竹塑复合材料界面及热稳定性的影响[J]. 福建林学院学报, 2013, 33(2): 188-192.
Xu J F, Zhen C X, Yang W B. Effects of coupling agents on the bamboo-plastic composites interface and thermal stability[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2013, 33(2): 188-192.
- [47] 陈钦慧, 李雪芳, 林金火. 铝酸酯偶联剂对竹塑复合材料界面性能的影响[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(1): 83-86.
Chen Q H, Li X F, Lin J H. Preparation and properties of chitosan modified bamboo powder /PVC composites[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2009, 29(1): 83-86.
- [48] 玉澜, 黄祖强, 胡华宇, 等. 机械活化强化硅烷改性竹粉/PVC 复合材料制备[J]. 应用化工, 2018, 47(3): 460-463.
Yu L, Huang Z Q, Hu H Y, et al. Study on mechanical activation strengthened silane modified bamboo/PVC composites[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(3): 460-463.
- [49] 姚雪霞, 李晓林, 巴子钰, 等. 壳聚糖改性竹粉/PVC 复合材料的制备和性能[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(1): 41-46.
Yao X X, Li X L, Ba Z Y, et al. Preparation and properties of chitosan modified bamboo powder /PVC composites[J]. Journal

- of Materials Science and Engineering, 2018, 36(1): 41-46.
- [50] 郑峰, 苏佳祥, 宋剑斌, 等. 马来酸酐接枝聚乙烯对稀土荧光竹塑复合材料性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(20): 38-42.
- Zhen F, Shu J X, Song J B, et al. Effects of PE-g-MAH on the properties of rare earth fluorescent bamboo plastic composites [J]. Materials Review, 2015, 29(20): 38-42.
- [51] 苏国基, 周吓星, 黄六莲, 等. 硅烷改性纳米氧化锌改善竹塑复合材料的防霉性能[J]. 塑料工业, 2016, 44(5): 88-92.
- Shu G J, Zhou X X, Huang L L, et al. Anti-mold performance of bamboo plastic composites with silane modified nano zinc oxide [J], China Plastics Industry, 2016, 44(5): 88-92.
- [52] 周吓星, 陈礼辉, 余雁. 钛酸酯偶联剂对竹塑发泡复合材料性能的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43(4): 434-439.
- Zhou X X, Chen L H, Yu Y. Effects of titanate coupling agent on the properties of bamboo-plastic foamed composites [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition). 2014, 43(4): 434-439.
- [53] 何文, 阮氏香江, 蒋身学, 等. 偶联剂对 HDPE 基竹塑复合材料性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 110-114.
- He W, Ruan S X J, Jiang S X, et al. Effect of MAH-g-PP on properties of bamboo flour (BF) / high density polyethylene (HDPE) composites [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(6): 110-114.
- [54] 王辉, 杨伟军, 邸明伟, 等. 偶联剂处理对木塑复合材料胶接性能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 112-115.
- Wang H, Yang W J, Di M W, et al. Effect of surface treatment by silance coupling agent on bonding properties of wood/polyethylene composites [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(4): 112-115.
- [55] 王雪玉, 吕文华. 增强-染色复合改性杨木的强度和耐光色牢度[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 147-151.
- Wang X Y, Lv W H. Strengths and light fastness of the strengthening-dyeing modified poplar wood [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 41(5): 147-151.
- [56] 洪浩群, 何慧, 贾德民, 等. 木塑复合材料界面改性研究进展[J]. 塑料科技, 2007, 35(8): 118-123.
- Hong H Q, He H, Jia D M, et al. Advances in research of interfacial modification of wood/plastics composites [J]. Plastics Science and Technology, 2007, 35(8): 118-123.