

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2018. 02. 001

杉木复合材料的制备和研究概况*

曹岩¹, 徐海龙^{1,2}, 杨吟野^{1,3}

(1. 贵州民族大学 贵州省优势生物质材料(木、竹、茶等)的开发与利用特色重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州民族大学 数据科学与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州民族大学 光电信息分析与处理贵州省特色重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 简要地概述了目前杉木复合材料的制备和性能研究进展, 综合介绍了杉木复合材料的制备工艺、影响因素和物理、力学性能的特点等, 并提出了杉木复合材料的应用前景和发展方向。

关键词: 杉木; 复合材料; 制备工艺; 物理特性; 力学性能

中图分类号: S 788; TS 653 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2018) 02-0001-07

Research Progress on Production of *Cunninghamia lanceolata* Composites

CAO Yan¹, XU Hai-long^{1,2}, YANG Yin-ye^{1,3}

(1. Special and Key Laboratory for Development and Utilization of Guizhou Superior Bio-based Materials (Wood, Bamboo, Tea, etc.),

Guizhou Minzu University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China; 2. Data Science and Information Engineering College of Guizhou

Minzu University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China; 3. Special and Key Laboratory of Guizhou Provincial Higher Education for

Photoelectric Information Analysis and Processing, Guizhou Minzu University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China)

Abstract: In this paper, the current research progress on *Cunninghamia lanceolata* composites were briefly reviewed. The production technologies, the impact factors and the physical characteristics and mechanical properties of *Cunninghamia lanceolata* composites were comprehensively introduced. Finally, the application prospects and development direction of *Cunninghamia lanceolata* composites were presented.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; composites; production technology; physical characteristics; mechanical properties

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*), 又名沙木、沙树等, 在我国其人工林面积达 $1.24 \times 10^7 \text{hm}^2$, 每年人工造林面积达 $4.00 \times 10^5 \text{hm}^2$, 每年杉木材积产量占全国商品材的五分之一^[1]。杉木也是我国分布较广的用材树种, 整个杉木分布区可分为 3 个带: 北带相当于植被区划的北亚热带, 在适宜的立地条件下, 20 年生杉木林年平均生长量每公顷可达 $6.0-7.5 \text{m}^3$; 中带相当于中亚热带, 其东部和中

部都是杉木的中心产区, 如贵州东南部就是历史上杉木的著名产地之一, 此外还有湖南西南部、广西北部、广东北部、江西南部、福建北部和浙江南部等, 20 年生的林分平均年生长量每公顷可达 $9-11 \text{m}^3$, 而一些小面积丰产林, 甚至高达 $15-30 \text{m}^3$; 南带相当于南亚热带, 这里杉木生长较差, 每公顷仅 $4-8 \text{m}^3$ 。杉木林是贵州省分布最广的森林类型之一, 基本遍及全省所有县市, 贵州省杉木林地面积

* 收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460171), 贵州省科学技术基金计划 (黔科合 J 字 [2015] 2075 号), 贵州省教育厅 (黔教合 KY 字 [2016] 003、黔教合 KY 字 [2017] 003、黔教合 KY 字 [2014] 136), 贵州民族大学教改项目 (GUN2016JC29)。

第一作者简介: 曹岩 (1984-), 女, 副教授, 博士, 主要从事生物质复合材料的制备及其物理、力学、蠕变和老化等性能的研究。

E-mail: 02190707@163.com

通讯作者简介: 徐海龙 (1983-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事木塑复合材料的制备、性能表征以及模型建立等研究。

E-mail: xu00hailong@163.com

$1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

杉木是主要的森林采伐和加工树种，在锯解、剖切和砂光等加工过程中，产生锯屑、废料等剩余物占原木材积的50%以上^[2-3]。如此丰富的生物质资源中仅有少量被作为低质燃料或原材料粗放利用，大部分尚未得到合理利用，没有发挥其天然纤维的特性优势，既存在生物质资源的严重浪费，又造成环境污染等问题^[4-7]。

此外，我国塑料利用率仅为25%，每年不能被及时回收和合理再利用的废旧塑料高达 $1.40 \times 10^7 \text{ t}$ ^[8]，废旧塑料的随意丢弃造成严重的环境污染。因此，废物回收和资源化利用的任务相当艰巨，资源利用技术滞后于社会需求的矛盾十分突出。

因此，制备杉木纤维增强聚合物复合材料，可用于户外地板、风景园林、外墙挂板、装饰材料等诸多方面^[9]，研究该种复合材料的性能不仅可以缓解环境污染问题，而且有助于提高材料的附加值，创造良好的经济效益。据粗略估计，每生产1t木塑复合材料，相当于少砍伐1.5棵30年树龄的树，减少 6×10^4 个废弃塑料袋的污染，减少7.60hm²农田的地膜残留隐患^[10]。木塑复合材料具有非常显著的生态环境效益，且具有原料资源化、产品可塑化、环保可再生等优势，是一个名副其实的低碳产业。同时，新技术的应用还会带来更多的就业机会，具有良好的社会效益^[11-12]。

本文概述了杉木复合材料的研究现状，综合分析了杉木复合材料的制备工艺、影响因子和物理、力学性能等，最后展望了杉木复合材料的应用前景和发展方向。

1 杉木复合材料的研究现状

21世纪以来，学者们对于杉木复合材料的研究是从杉木和基质的表面特性、两相的界面结合理论和形成过程、两相复合工艺与影响因子以及改进复合材料性能的有效措施等多方面展开的。

1.1 界面结合

2001年，中国林业科学研究院的王正^[13]以我国人工林木材杉木、杨木 (*Populus sp.*) 和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 为主要研究对象探讨了木材表面特性、木塑复合界面结合理论、界面的形成过程、木塑复合途径及其主要影响因子和木塑复合材料性能的改进措施。研究结果显示，木材表面

自由能、表面极性、表面化学官能团、表面粗糙度、小分子抽出物等成分对木塑复合界面及复合材料的物理、力学性能有显著影响。杉木的总表面自由能和非极性表面自由能的数值最高，分别为 42.4 mJ/m^2 和 41.6 mJ/m^2 ，相比杨木的总表面自由能和非极性表面自由能分别提高了11.58%和17.18%，相比马尾松的总表面自由能和非极性表面自由能分别提高了55.31%和155.21%；3种木材所形成的木塑复合材料的界面性能也存在差异，杉木/塑料复合材料的界面结合强度最高，杨木次之，马尾松最低；另外，杉木的表面极性最低，为 0.74 mJ/m^2 ，是杨木表面极性的21.70%，同时仅为马尾松木材表面极性的6.73%，杉木如此低的表面极性有利于提高其与塑料复合界面的强度；3种木材表面对像水分子这样的极性小分子物质的吸附能力不同，杉木/塑料复合材料界面的耐水性能较好，相反，马尾松表面对水分的亲和性较强，马尾松/塑料复合材料的界面耐水性能较差；木材的表面特性、塑料的表面特性、木材所含的化学成分、木材吸附的化学成分、塑料的理化性能指标、木塑复合途径、复合工艺因子等多种因素都对木塑复合界面的强度性能产生影响；木塑复合过程中，木塑复合的温度、时间和压力，材料密度，木材组元形态，配方因子（如树种、塑料种类、木塑配比和添加剂等）都对所制备的复合材料的性能有着非常重要影响。

2016年，刘如和张智林^[14]对上述研究结果做了补充，通过毛细管上升法测定了杉木纤维的表面接触角，并根据 Washburn 方程和 Owens-Wendt 法计算了杉木纤维的表面自由能及其极性和非极性分量，并与南方松 (*Pinus spp.*)、橡胶木 (*Hevea brasiliensis*) 和青杨 (*Populus cathayana* Rehd.) 作了对比。结果表明，杉木表面自由能较高，在制备木塑复合材料时，其液体润湿效果好，且杉木属于针叶材，简单的细胞壁结构降低了木纤维的极性值，表面自由能的非极性分量较高，表现出较强的非极性，与非极性物质的亲和力较高，最后指出，制备木塑复合材料时，应根据木纤维的表面自由能确定所用胶粘剂的种类。

1.2 杉木的改性

提高木质复合材料界面间的相容性的主要途径有2个，一是添加界面相容剂，二是改性木材。

为提高杉木的使用范围，改善其与聚合物的相容性，提高复合材料的力学性能，2010年，合肥

工业大学的闫小宇^[15]采用带有刚性基团的氯化苄和具有长分子链结构特征的十八烷酰氯,改性经 8% NaOH 溶液和丙酮处理的杉木粉(200 目),利用红外光谱分析(FT-IR)、X 射线衍射分析(XRD)、热重分析(TG)、差示扫描量热法(DSC)和扫描电子显微镜分析(SEM)等手段分析了改性杉木粉的结构和性能。对改性工艺进行了优化,分别将改性后的杉木粉与聚丙烯(PP)利用双辊筒炼塑机共混制备了复合材料,研究了改性杉木粉增重率(WPG)、含量对复合材料弯曲、拉伸和冲击等力学性能的影响,并使用 SEM 对复合材料冲击断面进行了表征和研究。研究表明,杉木粉经碱溶液处理后,在 1732cm^{-1} 处的羰基(C=O)伸缩振动吸收峰消失,杉木粉中的脂肪、糖类、色素和蛋白质等小分子量化合物被碱溶液溶出,杉木粉中木材纤维分子间的氢键遭到了一定程度的破坏,游离出了更多的羟基,并且经过碱溶液处理,杉木粉中纤维素的相对结晶度降低、晶体的尺寸减小,晶体结构在一定程度上受到了破坏。同时,处理后的杉木粉对水分的吸附能力略有下降,而热稳定性有所提高,500℃时杉木粉的残碳率由处理前的 23% 左右升高到处理后的 26% 左右;以甲苯为溶剂、NaOH 为催化剂,使用氯化苄对杉木粉进行了苄基化改性,制备了不同 WPG 的改性杉木粉,研究了工艺条件对改性杉木粉 WPG 的影响。通过 FT-IR、XRD、TG、DSC 和 SEM 等方法,研究了改性杉木粉的结构和性能,研究了改性杉木粉对水、乙醇、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、氯仿、正己烷的吸附性能。杉木粉改性后,木质纤维素结晶被破坏,500℃时残碳率为 20%,对溶剂的吸附性能随着改性杉木粉 WPG 的增长不断下降;经过改性后的杉木粉与 PP 的相容性明显优于未改性杉木粉与 PP 的相容性,并且改性杉木粉在 PP 中的分散性也更好。由于杉木粉和 PP 相容性的改善,提高了复合材料的冲击强度。苄基化杉木粉 WPG 为 50% (含量为 10%) / PP 复合材料和十八烷酰氯改性杉木粉 WPG = 55% (含量为 10%) / PP 复合材料力学性能相对较好。

2011 年,北京林业大学的姜卸宏等^[16]采用无可见的节子、无腐朽等缺陷、年轮密度均匀的杉木边材,将其加工成边长为 19mm 左右的立方体,并干燥至质量恒定。分别用一步法和两步法工艺配置处理液(PVDM-1 和 PVDM-2),前者是将一定比例的质量分数为 70% 的二癸基二甲基氯化铵

(DDAC) 和作为分散剂的聚合度为 1750 聚乙烯醇(PVA)以及 $7.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、阳离子交换容量(CEC)为 0.90mmol 钠基蒙脱土(Na-MMT)混合均匀后,球磨数小时用去离子水稀释得到,后者使用 DDAC 将 Na-MMT 改性制备有机蒙脱土后,将有机蒙脱土和 PVA 混合均匀加热并稀释后得到^[17-18]。分别将制得的 2 种处理液通过满细胞法真空-加压浸注杉木试样,具体工艺为抽真空 30min (真空度约为 0.09MPa),注入处理液,加压 2MPa 并保压 1h,取出试样烘至质量恒定后即得杉木增强聚合物复合材料。按照标准 GB 1934.2-2009 测定复合材料的吸水率和抗胀缩率(AS);按照标准 GB/T 4340.1-1999 使用维氏显微硬度计,加 19.614N 载荷 50s 测量复合材料的表面硬度,重复测试 30 次;在气干条件下采用万能力学试验机测量复合材料的顺纹抗压强度;参照美国木材保护协会 AWP A E11-07 标准进行抗水流失性测试。该实验组除了测试了上述复合材料的物理力学性能外还采用德国 BRUKER 公司生产的 Tensor27 型傅立叶变换 FT-IR 对其进行了表征,分析了两种方式制备的杉木复合材料在机理上的差异,旨在提供一种工艺简单且经济有效的木材改性处理方法。实验结果表明,一步法复合材料(PVDMW-1)的 AS 和抗水流失性明显高于两步法复合材料(PVDMW-2),而通过对比两者的吸水率和抗压强度并未发现明显的差异,PVDMW-2 的表面硬度好于 PVDMW-1;FT-IR 结果表明,PVDMW-1 在 521cm^{-1} 与 468cm^{-1} 附近出现了表征蒙脱土中 Si-O-M 和 M-O 的耦合振动的特征吸收峰,这说明 PVDMW-1 中蒙脱土已经进入了杉木细胞壁内。

2016 年,王翠翠等^[19]研究了纳米 CaCO_3 原位沉积工艺对杉木、慈竹(*Neosinocalamus affinis*) 和 黄 麻 (*Corchorus capsularis*) 的纤维表面改性效果,采用平压成型工艺制备了杉木纤维增强 PP 复合材料,研究了纤维表面形貌、表面粗糙度、静态接触角、拉伸性能以及复合材料断口形貌和力学性能。结果表明, CaCO_3 原位沉积改性对杉木纤维表面性能有显著影响,杉木纤维表面虽然比较平滑,但是纹孔多而大,更利于 CaCO_3 颗粒进入纤维细胞腔内^[20],因此 CaCO_3 上载量高达 16.08%,改性杉木纤维的表面粗糙度 R_q 值提高了 42.51%,静态接触角 SCA 增加了 3.12%,单根纤维的拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率分别提高了 29.28%、7.74% 和 13.35%,这是因为纤维空隙周围所承受

的载荷有效地传递到了填充进纤维微孔和沟槽中的 CaCO_3 上,从而阻碍缺陷所造成的纤维断裂。此外,杉木纤维 CaCO_3 原位沉积改性还显著改善了杉木/PP 复合材料的界面性能^[21],断口形貌 SEM 图中,改性杉木纤维与 PP 结合紧密,复合材料的断裂主要以纤维断裂为主,断口处没有空洞出现,复合材料的界面强度很高,拉伸强度和拉伸弹性模量分别增加了 9.63% 和 45.22%。研究结果为纤维表面改性技术在杉木纤维增强热塑性聚合物复合材料中的应用提供理论依据。

改性杉木的方法中除了使用化学原理,物理方法也十分有效。丁辉等^[22]用 120℃ 高温处理杉木纤维,发现其总表面张力的极性部分下降了 14.81%,非极性部分上升了 26.73%,而塑料属于非极性材料,根据相似相容原理,高温处理后的杉木纤维与塑料之间的结合力得到了增强,有利于制备木塑复合材料。另外,杉木纤维在高温处理下,官能团发生了变化,羟基破坏导致纤维表面羟基减少,非极性表面张力得到提高,同样有利于其与塑料聚合物形成良好的界面。2016 年,福建农林大学的邓邵平等^[23]也做了杉木粉热处理对木塑复合材料弯曲、拉伸和冲击等力学性能的影响的研究。

1.3 复合工艺

木质复合材料常见的制备方式是挤出法和热压法。

2008 年,天津大学的张然^[24]确定了双螺杆挤出机挤出造粒制备杉木纤维增强高密度聚乙烯 (HDPE) 复合材料的最佳工艺,即双螺杆挤出机箱体挤出温度为 150–155℃,螺杆转速为 30r/min,杉木纤维最佳加入量为 60phr,偶联剂选用乙烯-丙烯酸共聚物 (EAA) 且添加量为 10phr。采用优化工艺制备的杉木纤维/HDPE 复合材料的拉伸强度提高了 33.19%。

2015 年,徐开蒙等^[25]利用 2.66mm 长、长径比为 65.35、接触角为 90.32° 的杉木纤维增强聚氯乙烯 (PVC),通过同向平行双螺杆造粒和锥形双螺杆挤出两步法制备木塑复合材料,并研究其弯曲、拉伸和冲击等力学性能。结果表明,其弯曲强度和弹性模量分别为 45.63MPa 和 3.247GPa,拉伸强度和冲击强度分别为 29.14MPa 和 6.43kJ/m²,综合力学性能优于同种方法制备的尾巨桉 (*Eucalyptusurophylla* × *E. grandis*)、白千层 (*Melaleuca leucadendron* L.)、马尾松、枫香 (*Liquidambar formo-*

sana) 和蓖麻 (*Ricinus communis* L.) 杆等纤维增强 PVC 复合材料。另外,他们的研究也证明了杉木纤维/PVC 复合材料对彩绒革盖菌 (*Coriolus versicolor*) 和棉腐卧孔菌 (*Poria placenta*) 的耐腐蚀性较强,质量损失率分别为 0.54% 和 1.09%,该种抗菌耐腐蚀性能主要来自于杉木树种天然的抗菌和防腐功效。

2009 年,南京农业大学的张东辉^[26]采用模压成型工艺制备了杉木纤维增强 PP 复合材料,确定了最佳工艺参数:模压压力为 20MPa,温度为 180℃,保压时间为 15min,当杉木纤维填充量较高时,需适当增加模压压力和温度。

2016 年,福建农林大学的赖莹莹等^[27]研究了杉木/聚乙烯 (PE) 刨花板的制备工艺,确定了脲醛树脂胶 (UF) 的施胶量为 8%,PE 用量为 4%,石蜡添加量为 1.5%,热压温度为 180℃,热压时间为 7min 时,刨花板的静曲强度、弯曲弹性模量和内结合强度等力学性能以及吸水厚度膨胀率较好。树脂的水解化越小,耐水解能力就越弱,杉木刨花与 PE 之间相容性差,界面粘结力较小,水分容易进入板的孔隙中,4% 的 PE 在刨花板中起到了很好的隔水作用;增加施胶量有利于增加胶黏剂和杉木刨花板的胶接点,从而增强结合力,提高力学性能,8% 的施胶量赋予复合材料较好的胶黏强度和化学稳定性,施胶量过大,游离甲醛含量的增多导致胶层强度降低,结合强度下降;石蜡的憎水性利于阻碍水分,降低吸水厚度膨胀率,但过量的石蜡会削弱 UF 与刨花板的胶接强度;热压温度超过 180℃,杉木中的纤维素、半纤维素等发生降解,提取物中部分成分发生裂解和挥发,从而降低刨花板的力学性能,然而温度越高,越有利于 PE 基体的熔融与软化,且均匀分布,隔离水分;热压时间过短,芯层部分的胶黏剂固化效果不佳,影响芯层杉木刨花与基体的结合力,适当地延长热压时间可以提高胶的固化程度和 PE 的熔融,增加胶接力,减少胶层间的吸附断裂及水分的进入,但热压时间过长,胶和 PE 发生热降解,表层胶黏剂变脆,胶合强度降低。

除此之外,学者们也探索出了杉木复合材料的其他多种制备工艺。

2007 年,合肥工业大学化工学院的徐峰等^[28]以 80 目的人工林杉木粉为原料和正硅酸乙酯 (TEOS) 为无机前驱体,依据溶剂热法反应原理,采用溶胶-凝胶的方法制备了 SiO_2 /杉木复合材料。

使用改良的溶剂热法制备的复合材料中木材的WPG显著提高；通过热失重分析(TGA)发现交联网络的形成显著提高了材料的耐热性能,使失重10%时的热分解温度从纯木粉的270℃提高到409℃；通过FT-IR发现杉木中的羟基与正硅酸乙酯水解后的羟基发生了缩合反应,体系中存在Si-O-C交联网络；通过SEM发现SiO₂在高压反应釜的作用下充分进入到了存在纳米级空隙(介观空隙,为纳米材料的生长提供了空间)的杉木内与其中的羟基发生反应,形成了纳米级网状结构；通过XRD发现木质纤维素的结晶被破坏,木材增重率为78%的复合体系结晶度从纯杉木粉的75.37%下降到37.42%。

2013年,天津科技大学的刘辛燕等^[29]采用低温水热法制备了杉木/MnO₂光催化复合材料,研究了反应时间、盐酸浓度、反应温度等工艺条件对MnO₂负载率的影响。结论是当KMnO₄/HCL摩尔比为1:7、反应时间为80min、盐酸浓度为2mol/L、反应温度为70℃时,复合材料中的MnO₂负载率最高,可达到30.5%。

2015年,中南林业科技大学的汤静芳^[30]分别利用原位聚合法和溶化共混法制备两类醚化改性木粉增强聚苯乙烯(PS)复合材料。结果表明通过原位聚合法制备的木塑粉未见塑料颗粒,且均匀分散,界面相容性较好,而通过溶化共混法制备的木塑粉中有白色塑料颗粒,界面相容性较差。

2016年,中国原子能科学研究所的胡涛等^[31]用50kGy的高能量电子束辐射制备浸渍了含有双键不饱和和分子有机物单体MMA的杉木/PE复合材料,电子束辐照产生的自由基、离子和激发分子向单体或预聚物发生能量转移,引起杉木组织微孔中的单体产生反应,导致杉木内部结构更致密、坚硬和耐磨。复合材料的密度提高了80%,抗弯强度和抗弯弹性模量分别提高了64.1%和33.9%,顺纹抗压强度提高了97.8%,而24h吸水率降低了53%,该种杉木/PE复合材料的性能可以与稀少而珍贵的优质红木相媲美。

另外,利用杉木可加工的人造板中,除了上文提到的杉木刨花板以外,还有杉木纤维板、杉木胶合板和杉木重组木等。

早在1991年就有学者研制了杉木重组木,具体工艺为:将杉木小径材截断、蒸煮,达到软化杉木并增加含水率以便辊搓的目的,辊搓成木束后剔除树皮、节疤和腐朽等缺陷,经干燥后于20-25℃

条件下浸胶(酚醛胶)3min、脱去余胶、干燥至含水率为10%-14%,手工铺装成18mm厚的板坯,预压5min再热压成杉木重组木,此工艺中杉木小径材的利用率高达90%,且密度、含水率、顺纹抗压、顺纹抗拉、静曲强度和顺纹抗剪等性能与杉木和层积塑料相近,可用于生产各种建筑构件、普通家具和装饰物品。

2002年,研究人员利用正交试验法确定了杉木中密度纤维板的加工工艺:施胶量(酚醛树脂)为13%,热压温度为175℃,热压时间为6min,按此工艺制备的厚9mm、密度为0.88g/cm³的杉木中密度纤维板可以满足国家标准GB/T17657-1999《人造板及饰面人造板理化性质试验方法》的相关要求。

2015年,有学者利用杉木树皮中的木质素、酚酸等经碱降解替代面粉和豆粉等作为酚醛树脂的填充剂制备胶合板,并确定了热压最优工艺:杉木树皮用量为9%,热压压力为1.2MPa,热压温度为140℃,热压时间为1.2min/mm,胶合板胶合强度最佳,为1.12MPa^[32]。

1.4 复合材料性能研究

无论是对杉木与基质的界面结合研究,还是对杉木的改性研究,亦或对于两相复合工艺与影响因子的研究,最终目的是改善杉木复合材料的各项性能,从而拓宽其使用范围,延长其使用寿命。

2007年,福建农林大学的杨建华^[33]制备杉木机械浆复合板和杉木化机浆复合板,研究复合板中胶原纤维含量和活性炭添加量的对其抗弯强度、抗压强度等力学性能,甲醛、苯吸附性能,阻燃性能以及热稳定性的影响。

2009年,南京农业大学的张东辉^[26]的研究发现,杉木纤维粒径过小,其在PP中分散不均匀,复合材料力学性能较差,粒径过大,杉木纤维容易在界面处形成空洞缺陷,降低力学性能,增大吸水率,60目杉木纤维增强PP复合材料综合性能较好。

笔者也曾利用2步挤出法分别制备杉木纤维和马尾松纤维增强HDPE复合材料,研究两种复合材料的表面明度、颜色、密度、硬度、尺寸稳定性等物理性能和弯曲、拉伸、冲击等力学性能以及在50N载荷作用下的24h蠕变-24h回复性能。研究发现2种复合材料的尺寸稳定性均明显优于北方常用树种杨木纤维/HDPE复合材料,杉木纤维/HDPE复合材料更适合在户外潮湿环境中使用,马

尾松纤维/HDPE 复合材料更适合应用于受静载作用的构件^[34]。木塑复合材料常用作建筑材料和户外栈道、凉亭、座椅、包装制品等,会长期暴露于自然环境中,在贵州这样气候特别的省份,温和宜人的气候给木塑复合材料的户外使用提供了有利的条件,但多雨湿润的天气不利于延长木塑复合材料的使用寿命,杉木纤维增强聚合物复合材料的老化性能还需进一步研究。

2 展望

目前,全球化资源短缺和环境危机正在不断地加剧,节能环保的产品将愈加受到人们的青睐。杉木作为一种天然的、可再生的自然资源有着特有的、广泛的开发前景,其中以天然杉木为基材、用仿生技术研发复合材料就是材料科学与工程中非常重要研究方向之一。在杉木增强聚合物复合材料的研究和开发中,既要保证产品的良好使用性,同时也要兼顾自然资源的有限性并降低废弃物的排放量,另外从原料的提取、复合材料制备和使用,到产品的废弃和再生等都要符合环保要求。另一方面,杉木作为贵州省优势树种,杉木的密度较低,其增强聚合物复合材料的研究对于贵州省开发高强轻质复合材料具有重要的意义。木塑复合材料实现产业化,市场需求与产品成本和质量是关键,应按照市场应用要求调整配方和工艺,适当添加功能性助剂,例如防腐剂、防水剂、阻燃剂。

参考文献:

[1] 辛访华. 杉木林不同更新方式下土壤呼吸与微生物群落季节动态[D]. 福州:福建农林大学,2012.

[2] 刘一星. 木质废弃物再生循环利用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[3] 欧荣贤. 基于动态塑化的木质纤维塑性加工原理[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.

[4] Sudar A, Renner K, Moczo J, *et al.* Fracture resistance of hybrid PP/elastomer/wood composites[J]. *Composite Structures*, 2016, 141: 146-154.

[5] Jose M, Sara S, Fernando F S, *et al.* Impact of high moisture conditions on the serviceability performance of wood plastic composite decks[J]. *Materials and Design*, 2016, 103: 122-131.

[6] 郝建秀,王海刚,王伟宏,等. 利用弹性体增韧木粉/

HDPE 复合材料[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(5): 976-983.

[7] 曹岩,徐海龙,王伟宏,等. 模压成型的杨木纤维/高密度聚乙烯复合材料蠕变性能和蠕变模型[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(6): 1174-1178.

[8] 宋楠,王罗春,周涛,等. 废旧塑料无水清洁装置的设计及其清洗实验[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2457-2461.

[9] Rowell R M. Challenges in biomass-thermoplastic composites[J]. *J. Polym. Environ.*, 2007, 15(4): 229-235.

[10] 傅晓玉. 木塑——环保节能新使者[J]. *居业*, 2012(4): 37-40.

[11] 王清文,王伟宏. 木塑复合材料与制品[M]. 北京:化学工业出版社,2007: 11-15.

[12] Banga H, Singh V K, Choudhary S K. Fabrication and study of mechanical properties of bamboo fiber reinforced bio-composites[J]. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2015, 6(1): 84-98.

[13] 王正. 木塑复合材料界面特性及其影响因子的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2001.

[14] 刘如,张智林. 四种木纤维表面接触角和表面自由能的比较[J]. *陕西林业科技*, 2016(3): 20-23.

[15] 闫小宇. 氯化苈、十八烷酰氯改性杉木粉及对 PP 复合材料力学性能的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.

[16] 姜卸宏,曹金珍,罗冠群. MMT/PVA/木材复合材料的物理力学性能[J]. *林产化学与工业*, 2011, 31(1): 41-46.

[17] 汪亮. DDAC-OMMT 复合防腐剂的制备及其在木材中的应用[D]. 北京:北京林业大学,2010.

[18] 汪亮,曹金珍,刘炳玉,等. DDAC 改性蒙脱土-木材复合材料的应力松弛[J]. *林产化学与工业*, 2009, 2(5): 64-68.

[19] 王翠翠,张双保,姜瑜,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.

[20] Liang K, Shi S Q, Wang G, *et al.* Effect of impregnated inorganic nanoparticles on the properties of the kenaf bast[J]. *Fibers*, 2014, 2(3): 242-254.

[21] Xian Y, Chen F M, Li H D. The effect of moisture on the modulus of elasticity of several representative individual cellulosic fibers[J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(7): 1595-1599.

[22] 丁辉,姚鹏,张然,等. 木纤维的表面特性[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(2): 181-185.

[23] 邓邵平,林姿,黄前辉,等. 木粉热处理对木塑复合材料性能的影响[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(4): 488-493.