

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2023001

我国重组材料科学技术发展现状与趋势

于文吉

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 重组材料作为我国创制的一种新型绿色环保材料, 经过近20年的发展, 已初步建立基础理论体系和工艺技术装备体系, 重组竹和重组木实现了大规模工业化生产。剖析重组材料发展过程中面临的微观结构的重构过程与机制, 密度对重组材料影响机制、界面性能、耐候性、表面性能等科学问题, 以及重组单元制备技术、热处理技术、连续化浸渍技术与装备、重组单元整张化技术、热(冷)压成型等重大技术问题, 深入探讨重组材料在户外景观、家居、地板、结构材等领域的发展前景。

关键词: 重组材料; 重组竹; 重组木; 科学问题; 技术问题

中图分类号: TS653

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2023) 01-0001-07

Current Status and Future Trend of Science and Technology for Reconstituted Materials in China

YU Wenji

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: As a new type of green environment-friendly material innovated in China, the reconstituted material (scrimber), which is mainly composed of wood scrimber and bamboo scrimber has initially established a basic theoretical system, process technology equipment system and developed into a large-scale industry production after nearly 20 years. This paper analyzed the scientific problems in the development of reconstituted materials, including the process and mechanism of microstructure reconstruction, the effect of density mechanism on the properties of recombinant materials, etc., as well as the major technical problems, including the technology integration of recombinant units, hot/cold pressing, etc. In addition, the development trends of reconstituted materials in outdoor landscape, home furnishing, flooring, structural materials, and other fields were also discussed in depth.

Key words: reconstituted material; bamboo scrimber; wood scrimber; scientific problem; technical problem

收稿日期: 2023-01-06; 修改日期: 2023-01-20

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“高性能重组木连续化制造关键技术与装备”(2021YFD2200601); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“木质重组材料重大基础理论与关键技术研究”(CAFYBB2021ZX001)。

作者简介: 于文吉 (1962—), 男, 研究员。Email: yuwenji@caf.ac.cn

重组材料主要是以人工林木材、竹材和灌木等生物质资源为原材料, 采用纤维定向分离技术制备重组单元, 经树脂浸渍、干燥和成型压制而成的一种材料, 目前形成重组竹和重组木两大系列产品。重组材料作为一种高性能材料具有三个显著特点: 一是材料制备过程中性能可控、规格

可调和结构可设计；二是产品具有优良的物理力学性能，可与优质的硬阔叶树材媲美；三是实现小材大用和劣材优用，解决我国优质木材资源紧缺的问题^[1-4]。重组材料作为传统人造板的转型升级产品之一，我国在核心关键技术、产品和装备等方面具有国际领先水平并完全拥有自主知识产权，目前在重组材料及相关领域获得授权专利 109 件，发明专利 42 件，国际专利 1 件，专利权人排名世界第一，是世界上唯一能够实现重组材料大规模工业化生产的国家。目前该材料产品已经广泛应用于建筑、交通设施众多领域，并出口到欧、美、日等 100 多个地区和国家^[5-8]。重组材料生产技术的突破，对于保障我国木材供应安全，解决人工林木、竹材高值化利用产业难题、助力巩固脱贫成果和乡村振兴等方面都具有重要的意义，并为国家双碳目标的实现和我国木竹建筑绿色发展提供重要的先进材料支撑。

1 我国重组材料的发展现状

在国家相关部门的大力支持下，以中国林业科学研究院木材工业研究所牵头的科研单位、高校和相关企业，在国家高技术研究发展计划（“863”计划）、重点行业专项和重点研发计划支持下，经过近 20 年产学研紧密协同，初步建立了重组材料基础理论体系，在重组单元制备^[9]、环保树脂合成应用^[10-11]、高效成型技术^[12-15]、应用评价^[16-18]以及核心重组装备创制方面取得了重大突破。在此过程中获得国际和国家发明专利 100 余件，重组材料的标准体系初步建成（表 1）。

同时，重组材料核心成果获得 2015 年度国家科技进步二等奖并 10 余项省部级奖励，2017 年被国家发展和改革委员会列入《国家重点推广节能低碳技术推广目录》，两次入选国家林业和草原局重点推广项目 100 项，2020 年入选国家发展和改革委员会、科学技术部、工业和信息化部 and 自然资源部等四部委编写的《绿色技术推广目录》，也是我国林草加工行业唯一入选该目录的技术。

目前重组材料技术通过技术转让和专利授权在全国实施了大规模推广，已建成 100 余条生产线，年产能近 100 万 m³，有力促进了我国木材工业

表 1 重组材料的标准体系

Tab.1 Standard system for reconstituted materials

标准类别	标准编号	标准名称
国家标准	GB/T 40247—2021	重组竹
	GB/T 40241—2021	户外重组竹
	GB/T 30364—2013	重组竹地板
	GB/T 36394—2018	竹产品术语
行业标准	LY/T 3194—2020	结构用重组竹
	JG/T 537—2018	建筑及园林景观工程用复合竹材
	LY/T 3193—2020	竹质工程材料术语
	JG/T 569—2019	建筑装饰用木质挂板通用技术条件
	LY/T 1984—2022	重组木地板
	LY/T 3182—2020	森林生态旅游地木(竹)材产品使用技术要求
团体标准	T/CECS 10138—2021	工程竹材
	T/CWPIA 2—2020	户外重组竹地板铺装技术规范
	T/CECS 10257—2022	绿色建材评价 重组材
	T/CECS 1101—2022	工程竹结构设计标准
	T/CECS 1102—2022	工程竹结构施工及质量验收标准
地方标准	DB33T 952—2014	重组竹地板单位产品能耗定额及计算方法

的转型升级。与传统的人工林木、竹材相比，重组材料具有高强度、高尺寸稳定性和高耐候性等优点，并已经在港珠澳大桥、冬奥会、世界博览会、世界园艺博览会以及北戴河疗养区等数百项国家建设工程中得到大规模的推广应用（封面图片）。

2 我国重组材料的发展意义

重组材料的研发成功和大规模产业化生产，为我国大量的低值速生林和竹子资源的增值利用开辟了新的途径。据笔者不完全统计，2~2.5 t 木竹原材料可以生产 1 m³ 重组材，附加值提高 3~5 倍。重组材料规模化生产每年可增加林农直接收入 100 亿元以上，带动直接就业 10 万人以上，形成的全新产业链，极大地促进了林农奔小康的步伐，同时以实际行动践行总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的两山理论。

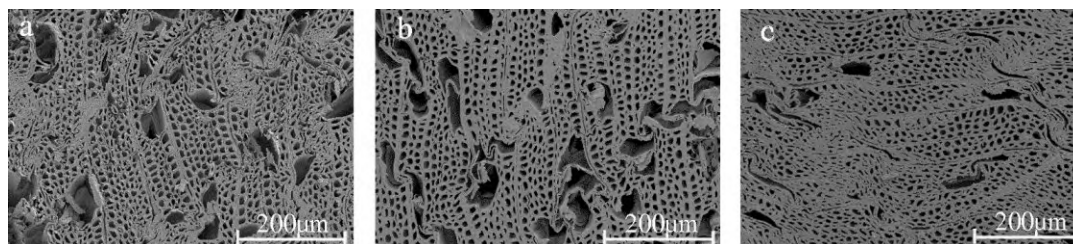
目前，我国正在推动的美丽中国和生态中国建设需要大量的绿色建材。据不完全统计，2022 年我国户外景观建筑以及步道栈道材料使用的防腐木以及木塑材料达 1 000 万 m³，而重组材料以其利用可再生资源、生产过程环保的低碳属性成为绿色建材的首选。同时，我国木质结构建材用优

质木材均需进口,重组材料可部分替代进口材料,满足我国木结构建筑的发展需求。

现阶段,我国木材对外依存度接近50%,随着中美贸易摩擦和新冠疫情的影响,优质木材的供应安全形势严峻。利用我国大量可再生的速生林木材和竹子资源制造的重组材料,可以替代优质木材,从而减轻木材进口的压力。据不完全估算,仅利用10%的速生林木材资源或竹子资源就可生产出1 000万 m^3 重组木/竹,即可以替代1/10的进口木材。同时,重组材料作为木竹资源高值化利用的典型产品,可以解决我国木材工业面临的附加值低、环保压力大和劳动生产率低的问题,极大地拓展原有人造板材料的应用范围和领域。

3 重组材料发展面临的科学问题

重组材料作为一种生物质复合材料,既保留了生物质材料的基本特点,如多孔性、纹理与花纹、保温隔热等优点,吸湿和老化降解等缺点;同时,由于合成树脂和功能性助剂的加入,使其原有性能有所改善。现阶段,重组材料面临的科学问题总结如下。



a 压缩率约50% (0.80 g/cm^3), b 压缩率约55% (0.90 g/cm^3), c 压缩率约60% (1.00 g/cm^3)。

图1 不同压缩率时杨木重组木的微观结构^[20]

Fig.1 Microstructure of poplar wood scrimber under different compression rates^[20]

3.2 重组材料的不同界面结构构筑与调控

重组材料在制备过程中合成树脂通过浸渍、喷涂或者辊涂的方式施加到重组单元的表面或者内部,形成不同尺度的胶合界面,这些胶合界面胶合效果的好坏直接影响重组材料的各种性能指标。总结胶合界面的分类如下:

1) 重组单元之间的胶合界面(图2a红色虚线部分),一般称之为宏观界面。该界面胶合效果的好坏对重组材料的性能影响最大,胶合差可引起重组材料开裂等缺陷。

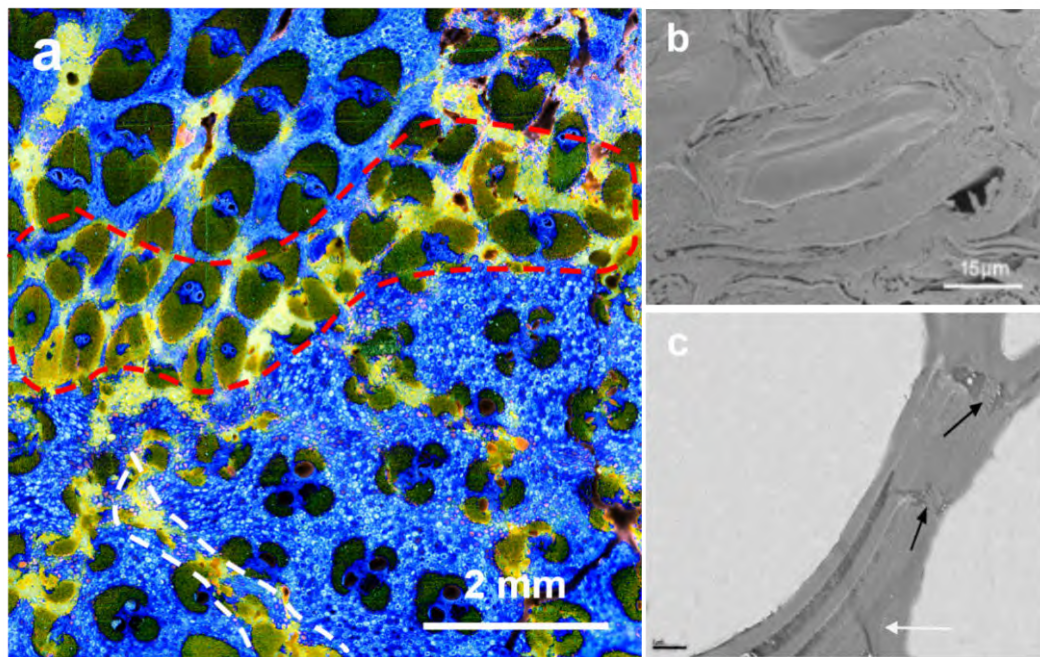
3.1 重组材料微观结构的重构过程与机制

重组材料是以生物质材料(针叶树材、阔叶树材和竹材)为原材料,通过对重组单元纤维疏解分离、施胶和成型制备而成。在重组成型过程中,生物质材料原有的微观结构发生形变重构,而重构的微观结构对重组材料物理力学性能以及耐候性能产生很大的影响^[19]。如在竹材重组过程中,刚度明显提高,韧性显著降低,薄壁细胞孔隙率降低了80%;另外,靠近竹黄处维管束的压缩率明显高于靠近竹青处,这显著降低了竹青和竹黄对重组材料性能的影响。

重组材料微观结构的重构过程主要取决于材料的压缩率。在重组过程中,原材料的压缩率在50%左右,密度范围为 $0.85 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$,压缩率越大,孔隙率越低(图1)^[20],但孔隙率对材料各性能的影响效应并未呈现简单的线性关系,同时原材料的差异对性能影响也很大,对于特定的原材料或者材种来讲,其极限压溃值依据不同的成型工艺有所不同,成型过程中微观结构变化趋势呈现的性能拐点以及重构过程材料力学性能变化规律与极限力学性能值得进一步探究和解释。

2) 重组单元内部在疏解过程中裂隙形成的胶合界面(图2a白色虚线部分),称之为介观胶合界面。这个胶合界面一般不会对重组材料表面形成明显的裂纹裂隙,但是在外界环境(水热、紫外线等)的作用下,会引起胶合界面失效开裂并形成微小裂隙。

3) 以细胞腔为主形成的微观界面(图2b)。生物质材料一个典型的特征就是多孔性,这些孔隙在树脂浸渍的过程中为树脂的均匀分布提供了通道,成型制备过程中,细胞腔被压缩、压扁,



a 超景深下重组材料的宏观(红色虚线)和介观胶合界面(白色虚线);b 扫描电镜下重组材料的微观界面^[21];
c 透射电镜下重组材料的超微胶合界面^[22]。

图2 重组材的多尺度胶合界面

Fig.2 Multiscale bonding interface of recombined materials

合成树脂固化后将其上下表面胶合在一起形成新的胶合界面,称之为微观胶合界面。微观结合界面的构筑,对重组材料耐水性能具有至关重要的作用。

4) 以细胞壁为主形成的超微胶合界面(图2c)。合成树脂在重组单元浸渍的过程中,会有一部分小分子进入到细胞壁中,在成型过程中,合成树脂不但自身进行缩聚反应,也和细胞壁本身的化学组分发生反应,细胞壁中形成的超微胶合界面不仅会提高细胞壁的硬度,还会改善细胞壁的润胀性能,具体的影响程度以及合成树脂渗透到细胞壁中形成化学键的结合程度,还需继续深入研究。

3.3 重组材料的老化降解机制

生物质原材料在重组过程中微观结构、组分比例、化学成分都发生了变化,这些变化理论上都会提高重组材料的耐老化特性,减少降解的速率,从而提高重组材料的耐久性。但在自然环境下使用,受到紫外光辐射、氧、水、微生物、温度、湿度等因素的影响,这些环境因子通过不同的机制作用于重组材料,使其理化性能发生变

化^[23],产生开裂(包括层间和层内开裂)、跳丝、变形等问题,限制了该材料的户外应用范围,也缩短了产品的户外使用寿命。目前相关研究主要集中在重组材料耐水热处理和耐光老化性能的评价方面,有关环境作用下重组竹的老化降解机制以及对老化特性的数值预测仍不清楚,需要进一步加大研究力度。

3.4 重组材料的表面性能调控机制

重组材料在表面形成的过程中,由于受到树脂浸渍、高温高压以及湿热等各种物理和化学因素的作用,表面的微观结构乃至化学性质都可能发生变化。重组材料在不同的场景中应用时,对其表面性能的要求不同。在室内场景中需尽可能显露出或者表达生物质材料本身的性质,如视觉(花纹、纹理)特性和触觉特性等^[24];在室外场景中则需要克服生物质材料的腐朽和发霉等缺点^[25-26]。

良好的涂饰性能是重组材料在家居领域应用的重要指标,这就要求对重组材料的表面性能进行更深入的研究和表征。如重组材料的粗糙度、润湿性和表面形貌对涂料附着力、耐久性和稳定

性的影响,不同涂料对重组材料表面适应性的评价等,同时重组材料的表面性能对二次胶合性能调控机制也需要进一步明确。

4 重组材料发展过程中面临的重大技术问题

重组材料作为我国创制的一种新型绿色低碳材料,发展至今不过20年的历史,相比其他传统的钢筋、水泥、塑料等材料,目前仍处于刚刚起步阶段,在相关制备技术不断完善提高的过程中,仍然面临着许多关键技术与核心装备需要突破和创制,从而不断提高制造水平,在规模上不断扩大,在质量上不断提高,引领国际重组材料领域的技术发展。

4.1 重组单元制备技术

重组单元是重组材料的基本构成单元,发明重组材料的最终目的就是要实现小材大用和劣材优用。依据重组单元的来源不同,如人工林木材和竹材,制备的重组单元也有所不同。竹材由于自身的生长特性,壁薄中空,目前只能以竹束或者纤维化竹单板的形式作为重组单元,核心技术问题主要为如何在不专门去竹青和竹黄的基础上完成单元的疏解分离过程,从而满足树脂渗透和胶合的需要;其次为高效连续化疏解提高单机产能问题。

对于速生木材重组单元,目前已经摒弃了直接疏解的理念,而是先进行单板化加工,薄单板直接裁切加工成重组单元,厚单板则进行疏解分离加工成重组单元。目前,评价重组单元质量的指标主要为疏解度,急需建立多参数指标体系下的重组单元评价体系。同时,重组单元宽度变化从几厘米到几十厘米,长度基本上也以终端产品的长度为主。未来的发展趋势是如何将重组单元规格化,从而满足后续连续化自动化成型工艺的需求。

4.2 重组单元热处理技术

在目前重组材料的制备工艺中,热处理工艺主要包括热处理和多段干燥工艺,对于重组单元热处理的主要目的是去除部分木、竹材中的淀粉和糖类物质,避免后续材料霉变;其次也可以增加重组材料的尺寸稳定性,但在重组单元的热处理

过程中会产生部分废水,因此后续的关键技术是如何在不对重组单元热处理的基础上实现防霉的效果。对重组单元施胶前和施胶后干燥技术,重组单元施胶前干燥含水率在35%~40%,需要将含水率干燥到10%以下,然后在树脂浸渍过程中重组单元含水率又重新恢复到35%左右,需要采用低温干燥($<70^{\circ}\text{C}$)再将多余水分去除,上述干燥过程能耗大且时间长。因此,最新的技术需求是如何在高含水率下实现树脂均匀浸渍,从而达到节能降耗的目的,也可实现重组单元备料工段的连续化和自动化。

4.3 重组单元连续化浸渍技术与装备

重组单元树脂浸渍过程是重组材料高质量制备的核心步骤之一,树脂在单元内部分布得越均匀,重组材料的性能就越好。目前主要采用非连续化间歇式浸胶方式,重组单元之间空隙得不到有效控制,浸渍过程中每个单元与合成树脂的接触面积与受力环境均有较大差异,从而制约单元内部、单元之间胶黏剂浸渍的均匀性,目前只能通过降低重组单元的含水率和延长浸渍时间来保证单元胶黏剂浸渍量的均匀性,但这导致重组单元制备过程的能耗加大和生产效率降低。因此采用连续化辊压浸渍技术不但可以提高生产效率,提高单元胶黏剂浸渍的均匀性,而且可以降低能耗^[27]。但目前尚需解决两方面技术难点:一是重组单元含水率在25%~30%时胶黏剂浸渍的均匀性;二是高压多辊可控树脂浸渍技术,即在挤压辊保持高压的情况下实现重组单元中胶黏剂浸渍的均匀性。

4.4 重组单元整张化技术

目前重组单元的宽度基本在30 cm左右,采用热压工艺生产重组材料,如何将重组单元均匀地铺装成板坯是一个难点问题。目前,相关研究一直探讨如何将重组单元像旋切单板一样实现整张化,从而满足后续连续化均匀铺装的要求,来保证重组材料密度的均一性。现阶段,如果要想实现重组单元整张化,需在浸胶干燥后进行;否则浸胶后干燥过程易造成重组单元的干缩,导致整张化的重组单元之间的缝隙过大,影响整张化的质量。

4.5 重组单元热(冷)压成型技术

重组材料的成型技术目前主要有两种,分别为热压成型板材和冷压成型方材的制备技术。在上述重组材料成型的过程中,有以下几个关键技术点需要重点关注:一是热压成型工艺中的热压温度。理论上热压温度越高重组单元塑化软化得越好,合成树脂在重组单元中的二次分布更加均匀,板材芯层达到要求的固化温度所需时间越短,热压效率越高。但过高的热压温度使板材内部的水分不易排出,从而导致板材发生“鼓泡”;二是热压过程中重组单元的含水率控制技术。重组单元的含水率越高,重组单元的刚性越小,板材热压过程中越容易压缩成型,从而保证板材密度的均匀性。但过高的含水率易导致热压过程中“鼓泡”现象的出现,同时还会延长热压时间。因此,后续研究需要精准开发重组单元含水率和热压温度协同调控技术,以提升热压效率。同时,需要对热压工艺过程板坯芯层温度、内部蒸汽压和重组单元的含水率进行实时监测,以提升重组材料制造的质量和生产效率。冷压成型技术与热压成型工艺相比,生产效率提高,能耗大幅降低,但需要关注冷压成型过程中重组材料密度均匀性的问题。另外,无论是冷压成型还是热压成型技术,在连续化和自动控制方面还有很大的提升空间。

5 重组材料未来的发展方向

重组材料作为一种新型的木质复合材料,不但解决了人工林木材和竹材小材大用、劣材优用的问题,并且最大限度地保留了生物质材料自身拥有的视觉特性和触觉特性,还具有其他三大传统材料——水泥、钢铁和塑料所不具有的绿色低碳的特点和属性。重组材料未来生产和应用的主要方向包括以下几个方面:

重组材料目前最大的应用领域为户外材料,鉴于其优良的耐候性和耐久性,其在户外应用市场所占的份额越来越大。重组材料的防腐性能可以达到强耐腐等级,防霉性能达到1级,已经在户外步道、栈道和园林景观工程中得到了大规模的推广应用。但户外应用的重组材料在防霉方面还需进一步提高和改善。

重组材料由于优良的尺寸稳定性和纹理特性,制备的家居产品深受消费者的喜爱。但是重组材料在作为家居材料使用时,由于密度高,表面粗糙大和润湿性差,影响其二次胶合的性能和表面涂饰性能,因此,这两方面的性能有待进一步研究。另外,我国的地热地板呈现快速发展的态势,所采用的实木地热地板和三层实木复合地热地板普遍存在尺寸稳定性差的问题,而重组材料具有在高温下不变形的特点,因此重组材料在地热地板领域具有广阔的前景,亟需加强重组材料热传导性能方面的研究工作。

重组材料具有绿色低碳特性,结构材料领域是其未来应用的重点领域。如重组材料在木竹结构建筑领域的应用前景可期,另外在交通护栏、铁路轨枕、岛礁建筑用材以及船舶用材领域都具有很大的发展空间。

重组材料技术是我国自主创新开发的新一代先进材料制造技术,由于该项技术没有国外技术可以借鉴参考,完全依靠国内专家探索发展,在关键技术和装备连续化自动化领域仍然存在极大短板,生产线尚未实现连续化自动化,单线产能低,仍属于劳动密集型,严重制约了我国重组材料产业做大做强,因此重组材料制造装备技术也是未来期待突破的重点领域和方向。

参考文献:

- [1] 于文吉,余养伦.我国木、竹重组材产业发展的现状与前景[J].木材工业,2013,27(1): 5-8.
YU W J, YU Y L. Development and prospect of wood and bamboo scrimber industry in China[J]. China Wood Industry, 2013, 27(1): 5-8.
- [2] 张亚慧,齐越,黄宇翔,等.我国高性能重组木材料制备技术开发与应用及未来发展[J].木材工业,2018,32(2): 14-17.
ZHANG Y H, QI Y, HUANG Y X, et al. Manufacturing technology, application and future development of high-performance wood scrimber in China[J]. China Wood Industry, 2018, 32(2): 14-17.
- [3] ZHANG Y H, HUANG Y X, QI Y, et al. Novel engineered scrimber with outstanding dimensional stability from finely fluffed poplar veneers[J]. Measurement, 2018, 124: 318-321.
- [4] HUANG Y X, QI Y, ZHANG Y H, et al. Progress of bamboo recombination technology in China[J]. Advances in Polymer Technology, 2019, doi.org/10.1155/2019/2723191.
- [5] 梁艳君,张亚慧,马红霞,等.户外用杨木重组木的制备工艺与性能评价[J].木材工业,2017,31(2): 49-52.
LIANG Y J, ZHANG Y H, MA H X, et al. Preparation and properties of *Populus* scrimber for outdoor use[J]. China Wood Industry, 2017, 31(2): 49-52.
- [6] 张亚慧,齐越,雍娟,等.自然保护地工程项目建筑材料的科学选用[J].自然保护地,2022,2(3): 75-81.

- ZHANG Y H, QI Y, YONG J, et al. Scientific selection of the landscape construction materials in natural protected areas[J]. Natural Protected Areas, 2022, 2(3): 75-81.
- [7] 祝荣先, 于文吉. 风电叶片用竹基纤维复合材料力学性能的评价[J]. 木材工业, 2012, 26(3): 7-10.
- ZHU R X, YU W J. Mechanical performance of a bamboo-based fiber composite for wind turbines[J]. China Wood Industry, 2012, 26(3): 7-10.
- [8] 余养伦, 秦莉, 于文吉. 室外地板用竹基纤维复合材料制备技术[J]. 林业科学, 2014, 50(1): 133-139.
- YU Y L, QIN L, YU W J. Manufacturing technology of bamboo-based fiber composites used as outdoor flooring[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 133-139.
- [9] 魏金光, 饶飞, 张亚慧, 等. 疏解工艺对毛白杨与辐射松重组木物理力学性能的影响[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 51-54.
- WEI J G, RAO F, ZHANG Y H, et al. Effect of veneer crushing process on physical and mechanical properties of scrimbers made of *Pinus radiata* and *Populus tomentosa*[J]. China Wood Industry, 2019, 33(2): 51-54.
- [10] RAO F, JI Y H, LI N, et al. Outdoor bamboo-fiber-reinforced composite: influence of resin content on water resistance and mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120022.
- [11] RAO F, JI Y H, HUANG Y X, et al. Influence of resin molecular weight on bonding interface, water resistance, and mechanical properties of bamboo scrimber composite[J]. Construction and Building Materials, 2021, 292: 123458.
- [12] 梁艳君, 张亚慧, 马红霞, 等. 户外用杨木重组木的制备工艺与性能评价[J]. 木材工业, 2017, 31(2): 49-52.
- LIANG Y J, ZHANG Y H, MA H X, et al. Preparation and properties of *Populus* scrimber for outdoor use[J]. China Wood Industry, 2017, 31(2): 49-52.
- [13] 韦亚南, 张亚慧, 张亚梅, 等. 浸胶疏解单板含水率对杨木重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(4): 35-38.
- WEI Y N, ZHANG Y H, ZHANG Y M, et al. Effect of moisture content of impregnated veneer on properties of poplar scrimber[J]. China Wood Industry, 2017, 31(4): 35-38.
- [14] ZHANG Y H, QI Y, HUANG Y X, et al. Influence of veneer thickness, mat formation and resin content on some properties of novel poplar scrimbers[J]. Holzforschung, 2018, 72(8): 673-680.
- [15] RAO F, WEI J G, QI Y, et al. Effect of core temperature on some important properties of poplar scrimber boards during the heat curing process[J]. Forest Prod J, 2019, 69(3): 210-216.
- [16] 张亚慧, 由佳, 杨婵, 等. 户外用重组木加速老化耐久性能的评价[J]. 木材工业, 2018, 32(1): 33-35.
- ZHANG Y H, YOU J, YANG C, et al. Durability of wood scrimber for outdoor use by accelerated aging tests[J]. China Wood Industry, 2018, 32(1): 33-35.
- [17] HUANG Y X, QI Y, ZHANG Y M, et al. Surface properties of novel wood-based reinforced composites manufactured from crushed veneers and phenolic resins[J]. Maderas Ciencia y Tecnología, 2019, 21(2): 185-196.
- [18] ZHANG Y H, YU W J, Kim N, et al. Mechanical performance and dimensional stability of bamboo fiber-based composite[J]. Polymers, 2021, 13(11): 1732.
- [19] YU Y L, LIU R, HUANG Y X, et al. Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 1032-1039.
- [20] ZHANG Y M, HUANG X A, ZHANG Y H, et al. Scrimber board (SB) manufacturing by a new method and characterization of SB's mechanical properties and dimensional stability[J]. Holzforschung, 2018, 72(4): 283-289.
- [21] JI Y H, LEI W C, HUANG Y X, et al. Influence of resin content and density on water resistance of bamboo scrimber composite from a bonding interface structure perspective[J]. Polymers, 2022, 14(9): 1856.
- [22] 孟凡丹. 竹基纤维复合材料胶合界面及机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [23] ZHANG Y H, MA H X, QI Y, et al. Study of the long-term degradation behavior of bamboo scrimber under natural weathering[J]. Npj Materials Degradation, 2022, 6: 63.
- [24] 冀瑶慧, 黄宇翔, 张方达, 等. 我国重组竹工艺性能、应用设计及感性评价研究综述[J]. 世界林业研究, 2022, 35(6): 82-87.
- JI Y H, HUANG Y X, ZHANG F D, et al. Process performance, application design, and kansei evaluation of bamboo scrimber in china: a review[J]. World Forestry Research, 2022, 35(6): 82-87.
- [25] ZHANG Y H, HUANG Y X, MA H X, et al. Effect of different pressing processes and density on dimensional stability and mechanical properties of bamboo fiber-based composites[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2018, 46(4): 355-361.
- [26] QI Y, HUANG Y X, MA H X, et al. Influence of a novel mold inhibitor on mechanical properties and water repellency of bamboo fiber-based composites[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2019, 47(3): 336-343.
- [27] 张亚梅, 祝荣先, 余养伦, 等. 辊压树脂定向渗透工艺对竹束干燥及重组竹性能的影响[J]. 林业工程学报, 2022, 7(5): 44-49.
- ZHANG Y M, ZHU R X, YU Y L, et al. Effects of the resin directional penetration by rolling technology on the drying process of bamboo bundles and bamboo scrimber properties[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(5): 44-49.

(本文编校 孟凡丹)