

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021040

重组木制造技术研究进展与展望

高旭东¹, 亓燕然¹, 范吉龙¹, 李长贵², 张舒情³, 李永峰¹

(1. 山东农业大学林学院; 黄河下游森林培育国家林业和草原局重点实验室, 山东泰安 271018; 2. 山东省林业科学研究院, 山东济南 250014; 3. 山东京博木基材料有限公司, 山东滨州 256500)



摘要: 依据原料基本单元形态的不同(细长小径材形态和宽薄单板), 将重组木分为两类: 传统重组木和高性能重组木。围绕两类重组木的制备工艺, 重点论述主要工艺的研究进展, 分析瓶颈问题; 针对高性能重组木关键技术的薄弱环节, 提出优化木束单元精细疏解技术、提升加工装备自动化水平、开发绿色功能化的高端产品, 构建完善的理论技术体系等建议。

关键词: 重组木; 小径材; 疏解单板

中图分类号: S784; TS653 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0022-07

Research Status and Trends of Wood Scrimber Manufacturing Technology

GAO Xu-dong¹, QI Yan-ran¹, FAN Ji-long¹, LI Chang-gui², ZHANG Shu-qing³, LI Yong-feng¹

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Silviculture of the Lower Yellow River, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China; 2. Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, Shandong, China; 3. Shandong Jingbo Wood-based Material Co. Ltd., Binzhou 256500, Shandong, China)

Abstract: According to the morphology difference of the raw-materials (small-diameter logs and wide-and-thin veneer), the wood scrimbers were divided into two categories: the traditional wood scrimbers and the high-performance wood scrimbers. In this paper, the processing technologies were reviewed and discussed, and the bottleneck issues were analyzed. In view of the weak points of the key technologies for the high performance scrimbers, four suggestions were proposed, including optimization of the fine crush technology for the wood bundles, increasing automation of the processing equipment, developing green and multifunctional wood scrimbers, as well as building sound theoretical and technical systems.

Key words: wood scrimber; small-diameter log; crushed veneers

随着现代经济社会发展和人们生活水平的提高, 木材在家居环境中的需求量越来越大。然而, 在全球木材采伐收紧的大背景下, 优质木材供应

越来越短缺, 供需矛盾日趋尖锐^[1]。当前, 木材尤其是优质木材供应短缺的问题已经上升到了国家“木材安全”的战略高度^[2]。因此, 充分利用速生材、小径材, 开发高附加值的木基新材料成为解决当前木材利用瓶颈问题的战略举措。重组木因具有高效率、高性能的特点, 成为业界关注、开发和应用的**重要材料。

1973年, 澳大利亚科学家 John Douglas Coleman 提出重组木的概念^[3]。重组木是以各种小

收稿日期: 2021-04-14; 修改日期: 2021-06-16

基金项目: 山东省林业科技创新项目“杨木增强与尺寸稳定化关键技术研发与应用示范”(LYCX10-2018-50); 教育部2020年第一批“产学研合作协同育人”项目“《木材改性》课程改革研究”(202002204012)。

作者简介: 高旭东(1998—), 男, 硕士研究生。Email: gxd2992@126.com

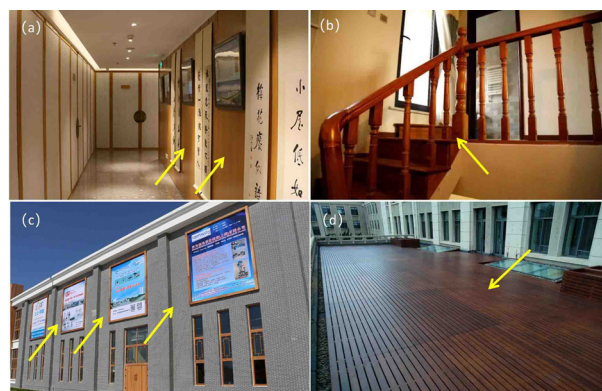
通讯作者: 李永峰, 男, 教授。Email: lyf288@hotmail.com

径材、枝桠材为原料，在不打乱木纤维排列方向、保留木材基本特性的前提下，将其碾压疏解，形成纵向排列、横向连接的木纤维束（简称“木束”），然后经热压胶合形成的一种兼具强度和木材纹理的材料。重组木既高效地利用了林业剩余物资源，又充分利用了木纤维定向排列的特点，因此在纵向上具有较高的力学性能，自诞生以来，受到学术界和工业界的广泛关注^[4-5]。

随着研究的深入和技术的进步，重组材的原材料被拓展到速生小径材^[4]、枝桠材^[6]、灌木材^[7-8]、竹材^[9]、农作物秸秆^[10-11]等，且在工业界实现了规模化生产，得到了广泛的应用。在重组材中，重组木以其纹理、加工性能等最接近天然木材属性及性能优异等特点，被视为天然优质木材的替代者^[4]，广泛应用于室内楼梯、墙板、家具、门窗和室外的景观厅、地板、挂墙板等领域（图1）。

在重组技术发展的过程中，原料结构单元经历了两个形态的变化：细长小径材和宽薄单板，对应制备的重组木产品也分为两类：传统重组木和高性能重组木。高性能重组木的综合性能优于传统重组木，是当前主流的重组木产品^[12-13]。本文聚焦两类重组木，围绕两类重组木的制备工艺和加工装备，重点论述工艺流程各环节的技术进展；在此基础上，分析重组木技术的瓶颈问题并提出发展建议，

旨在为改进、优化高性能重组木材料提供方向。



a 室内装饰挂墙板；b 楼梯；c 室外挂墙板；d 户外地板

图1 重组木在室内外的应用案例

Fig.1 The application cases of wood scrimbers in indoor and outdoor uses

1 传统重组木技术研究进展

传统重组木是以速生小径材、制材边角料、枝桠材、灌木材等细长小径类形态单元为原材料，经碾压加工成横向不完全断裂、纵向松散而又交错相连的网状木束，再经施胶、干燥、组坯、热压而制成的一种沿原材料纵向方向木束定向、排列的重组材料^[4-5]（图2）。围绕这类重组木，研究人员重点研究了制备过程中的关键因素，包括加工设备、碾压、施胶、组坯和热压等对重组木性能的影响，为完善传统重组木工艺技术奠定了基础。

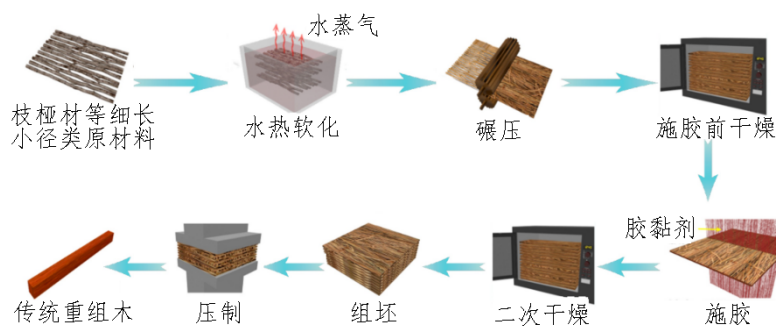


图2 传统重组木制备工艺流程

Fig.2 Manufacturing process of the traditional wood scrimbers

1.1 主要工艺

1.1.1 碾压疏解

通常选用直径在8~16 cm的小径级木材作为适宜的原材进行碾压处理^[4]，以便疏解成网状木束。通常，新伐材无需蒸煮处理即可直接疏解，而干材则需加压蒸煮软化预处理，并控制含水率在50%~80%，以便获得均匀疏解的木束。树皮对

重组木的性能影响不大，但颜色较深影响外观和重组木的纹理^[4]。

碾压工艺的关键因素是碾压次数。研究显示，碾压次数为3次时重组木的各项性能较佳；超过3次后，重组木的内结合强度及耐水性降低^[7-8]。碾压次数较多，会使木束被碾断成碎束，进而降低了木束自身的力学强度，最终降低重组木的性能^[8]。

1.1.2 施胶

为确保木束的施胶效果,建议控制木束的含水率在10%左右。重组木主要用胶为小分子量、低固体含量(20%左右)、低黏度($<50\text{ mPa}\cdot\text{s}$)的酚醛树脂胶。施胶工艺影响因素包括施胶方式、施胶量以及施胶时间等。

1) 施胶方式:主要有负压浸胶和正压喷胶两种。通常,浸胶的效果优于喷胶的效果,导致浸胶木束制备重组木的整体性能优于喷胶木束制备的重组木^[14]。主要是因为:负压浸胶会使胶黏剂均匀地包覆在木束表面,同时渗入到细胞腔内部,从而提升重组木的综合性能^[15]。喷胶虽然存在施胶不均的问题,但可节省用胶量,相对降低成本^[6]。在实际应用中可根据产品用途选择合适的施胶方式。

2) 施胶量:通常情况下,在一定范围内,随着施胶量的增加,重组木的综合性能会提升,施胶量达到临界值后,各性能变化趋势变缓^[16]。研究显示,在5%~11%的施胶量范围内,当施胶量从5%增加到9%时,重组木的力学性能和耐水性显著提高,但从9%增加到11%时,各性能变化不大,内结合强度甚至降低,而且导致成本升高^[17]。主要原因是:适当的施胶量可以使重组木内部纤维间得到有效胶合,进而增强力学性能和尺寸稳定性^[18-19]。实际生产中,应根据树种和产品性能需求综合确定施胶量的大小。

3) 浸胶时间:通常情况下,在一定范围内,随着浸胶时间的延长,木束的浸胶量和浸渍均匀性会提高,达到临界值后,再延长浸胶时间,重组木的综合性能变化不大。兼顾产品性能和生产效率,建议浸胶时间控制在5~10 min范围内,控制浸胶木束干燥后的含水率在10%左右,以保证后续压制过程中重组木的合格率和综合性能^[7]。

1.1.3 组坯、热压

浸胶干燥过的木束可以不同角度铺装组坯,形成不同取向的重组木。研究显示,当木束以相邻层间相差0°、45°和90°等角度铺装组坯时,制得的重组木性能有差别;其中,木束以0°平行铺装形成的重组木具有最好的力学性能和耐水性能,而以45°和90°铺装组坯形成的重组木的横纹和顺纹干缩率小,不易翘曲变形^[8,17]。

传统重组木通常采用热压方法制备。在热压过程中,影响重组木性能的主要因素是热压温度和时间。研究显示^[8],在120~160 °C的范围内,随着热压温度的升高,沙柳重组木的各项性能提升,当达到160 °C时,其综合性能达到最佳,这主要归因于适合的温度有利于胶层良好固化。热压时间取决于板材的厚度,在此不再赘述。

1.2 加工设备

传统重组木的主要加工设备包括:剥皮机、疏解机、施胶设备、干燥设备和冷、热压机^[20];其中,影响重组木性能的关键设备是疏解机。

将小径原木放入疏解机中进行疏解,制成纵向排列、横向连接的网状木纤维束。疏解加工的基本原理及步骤:1) 粗辊碾压。根据小径材径向强度低、易裂解的特性,对原料施以超过木材弹性极限(屈服点)的足够大的径向辊压力,小径原木在上下粗辊压力的作用,初步形成相互连接但不完全分离的较粗的网状结构;2) 细辊展平。木材经过上述辊压之后,有部分未达到塑性变形,在其变形未恢复之前,经过细辊作用,木材进一步达到疲惫状态,形成径向裂开、相互连接但不完全分离的较细的网状结构;3) 梳齿粗梳。紧接着用梳齿(梳解刀)对较细的网状结构(梳解加工坯料)进行初步纵向梳解,梳齿(梳解刀)运动方向基本与木纤维方向一致,对坯料进行顺纹劈削、剪切、挤压,进行类似梳头发的加工,实现坯料的初步分离;4) 细梳分离。对粗梳后的网状木束进行若干次梳解,将其彻底分离成精细的网状结构(细梳),目的是对木材进一步进行纵向分离^[21]。在疏解过程中,不同疏解辊的位置、直径、辊齿参数都要根据不同的原料进行设计^[21-23]。

现阶段,虽然传统重组木的加工设备已经较为完善,但仍有一些待改进的问题。

① 疏解机:木材具有横向射线组织、节子等,在疏解过程中特别容易断裂,进而影响重组木的性能^[23]。所以,对疏解辊压力控制装置、疏解辊间隙在线调节装置、疏解齿形状结构等应进行创新设计,以获得疏解程度合格的基本单元。

② 热压机:当前的热压机尚无法做到连续工作(冷进-冷出),导致热压周期长、效率低,且

冷-热压工艺时无法连续进行,自动化程度不高^[24]。以上的设备问题影响了传统重组木的工业化效率。

经过上述工序,以木束为单元制备的重组木密度通常介于 $0.80\sim 1.20\text{ g/cm}^3$ ^[24-27]。但传统重组木技术在应用过程中尚存在原料质量参差不齐导致含水率控制不均、碾压应力难以消除、定向铺装无法机械化等瓶颈问题,导致该技术未实现稳定的工业化生产和完善的技术体系^[28-29]。

2 高性能重组木技术研究进展

针对传统重组木的技术瓶颈问题,中国林业科学研究院木材工业研究所研究人员在高性能竹

基纤维复合材料制造技术的纤维可控分离技术的基础上,以原木旋切单板为原材料,通过碾压处理实现纤维可控分离,并制备高性能重组木,有效地解决了传统重组木木束单元疏解不均造成的含水率不可控、应力集中等关键问题^[2]。

高性能重组木的制备工艺流程(图3)与传统重组木相似,主要区别在于原料为旋切单板,经碾压疏解后可形成结构均匀的基本单元,为控制均匀的含水率和浸胶量提供了前提。高性能重组木后续的工艺环节,包括浸胶、干燥、组坯及压制等与传统重组木制备工艺对应的环节基本相同,本文重点阐述与传统重组木工艺的差异。

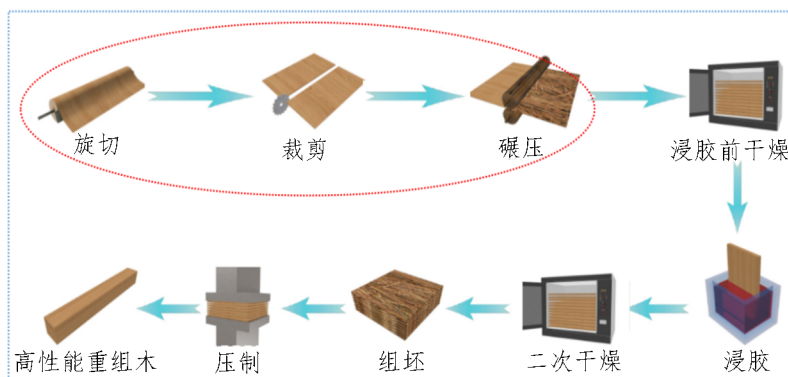


图3 高性能重组木制备工艺流程

Fig.3 Manufacturing process of the high-performance wood scrimbers

2.1 主要工艺

2.1.1 单板旋切

高性能重组木的原料单元是旋切单板。常用木材树种包括杨木 (*Populus spp.*)、柳木 (*Salix spp.*)、桉树 (*Eucalyptus spp.*)、泡桐 (*Paulownia spp.*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、荷木 (*Schima superba*)、木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*)、落叶松 (*Larix gmelinii*)、辐射松 (*Pinus radiata*) 等。单板厚度是影响高性能重组木的关键因素^[30]。研究显示,原料基本单元厚度介于 $2\sim 6\text{ mm}$ 时,重组木的力学性能随基本单元厚度的增加而减少,但耐水性能提高;一旦基本单元厚度超过 6 mm ,重组木的力学性能和耐水性能均呈下降趋势^[30]。主要原因是:基本单元经疏解碾压后自身强度遭到破坏,使重组木力学性能下降;但比表面积增加,故耐水性能提高;厚度进一步增加,单板疏解不充分,造成浸胶不均匀,故影响其综合性能^[24]。

2.1.2 浸胶、干燥与组坯

浸胶前,通常控制基本单元的含水率约 12% 。高性能重组木主要采用真空-加压浸渍的施胶方式^[31]。研究表明,合理控制真空-加压浸渍的条件,既保证浸胶量均匀又不会造成胶黏剂浪费;值得注意的是,浸渍过量的胶黏剂对后续重组木的性能产生负面影响^[32]。浸胶后,为确保重组木性能,宜控制基本单元的含水率在 $5\%\sim 20\%$ 范围内^[33-34]。

高性能重组木的基本单元组坯可以采用平行铺装和顺纤维任意方向铺装两种方式(图4)。两种铺装方式对重组木的性能影响不明显;但平行铺装的板坯,在成型过程中所需压力小,时间更短,制备重组木的表面纹理也更接近木材的天然纹理^[35]。

2.1.3 压制

压制高性能重组木有冷压-热固化和热压两种方式。通常,板坯越均匀,其热传导越快,胶层固化越充分,材料的性能越好。受限于传热速率,热压法压制重组木的适宜厚度为 $2\sim 3\text{ cm}$;冷压-热固化

则适用于压制更大厚度的板材(10~20 cm)^[36], 所得重组木的尺寸稳定性也更好^[37]。经上述工艺制备高性能重组木的密度通常介于0.80~1.20 g/cm³^[38-42]。

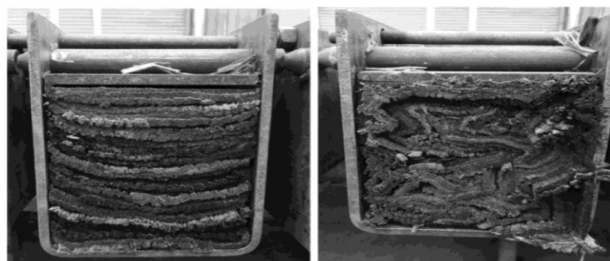


图4 高性能重组木制备的两种铺装方式^[35]

Fig.4 Two paving methods for preparing of the high-performance wood scrimbers

2.2 加工设备

高性能重组木制备过程中, 涉及的设备包括: 单板旋切机、定向精细疏解机、冷压机和热固化设备。其他工序的设备与制备传统重组木的基本相同^[22], 不再赘述。

单板旋切机: 将原木放入单板旋切机内, 旋切刀在挤压摩擦力的下方旋入原木内, 驱动原木旋转前进, 被旋切成薄板^[30]。现有旋切机的旋切单板厚度一般<3 mm。薄单板在疏解工序中的效率较低, 为提高疏解效率, 需使用厚单板。目前高性能重组木用的单板旋切机加工单板的厚度可达8 mm^[23]。

定向精细疏解机: 旋切单板在疏解辊的挤压力和切割力的作用下, 表面产生了一系列点状或线段状裂纹, 从而使木材纤维、导管、基本组织等细胞发生撕裂破坏。与传统重组木疏解机不同的是, 定向精细疏解技术突破了传统以小径木为单元的疏解技术, 形成了形态均一、面密度分布均匀的定向线裂纤维化重组单元, 有效地解决了木束易断裂、应力集中等问题^[23]。

冷压-热固化设备: 将浸胶后的单板放入冷压模具当中, 按照所需产品的指标设定好相应的压力和时间, 冷压成型; 然后将冷压成型的板材连同模具一起送入热固化设备中, 设定好温度和时间, 最终制成高性能重组木^[18]。

就目前的技术而言, 高性能重组木的加工设备仍存在问题亟待解决。疏解机: 疏解过程中难以实现连续自动化, 导致后续胶黏剂渗透不均匀, 最终影响重组木密度的均匀性, 降低板材性能^[22]。冷压-热固化设备: 与传统重组木的热压

设备问题基本相同, 其除了冷压-热固化过程中热固化的时间过长造成生产效率低外, 设备的连续自动化问题、适应不同生物质原材料的重组木的生产问题等也有待完善^[23]。

3 重组木制造技术研究展望

高性能重组木技术, 是我国自主创新研发并推广应用的新型木材重组技术, 有力推动了木材重组产业的发展, 一定程度上缓解了优质木材供应紧张的局面, 整体技术已达国际领先水平。展望未来, 针对重组木技术的薄弱环节, 应加强基础理论研究, 不断优化木束单元精细疏解技术, 提升加工装备自动化水平, 开发绿色功能化的高端产品, 构建完善的理论技术体系, 推动重组木产业向更广范围、更高层次、更新阶段发展。

1) 木束单元可控精细疏解技术。

高性能重组木通过原料更新, 保障了原料形态的结构均匀, 提高了重组木产品的力学强度和稳定性, 但决定重组木力学强度的关键因素还包括木束单元本身结构的精细程度。理论上, 只有木束单元疏解越细长, 结构越均匀, 重组木的力学性能才可能更高。所以, 着重研究木束单元的可控精细疏解技术, 有望进一步改善重组木的综合性能。

2) 加工装备自动化。

现阶段, 重组木制备过程中的定向铺装组坯工艺、冷-热压衔接环节仍以人工为主, 尚不能实现连续化^[26]; 此外, 旋切/碾压、施胶环节的设备难以实现精准化控制, 无法实现产品性能与成本的精准匹配。所以, 重组木的加工装备自动化应是未来重点加强研发的领域。

3) 胶黏剂体系构建。

重组木制备主要用小分子量的酚醛树脂胶黏剂, 固化后的酚醛胶脆性大。目前, 少数研究探索了二乙二醇单乙醚、无机纳米材料等增韧剂对酚醛胶增韧改性的研究^[44-45], 未来仍需深耕研发, 尤其从胶黏剂的分子结构入手, 依据产品用途和性能需求, 定向设计胶黏剂的分子链结构, 可控合成胶黏剂, 精细控制分子量、黏度等, 构建适合重组木浸胶工艺的胶结技术体系。此外, 拓展胶黏剂种类、改良性能也会丰富重组木的产品体系, 拓展重组木

的应用范围仍是未来研究的方向之一。

4) 完善产品种类体系。

目前, 重组木主要应用在室内家居和户外轻型梁柱结构等领域。未来, 应从绿色化、高性能化、功能化等角度丰富重组木产品体系, 拓展其在汽车、火车、飞机等交通运输工具和高层木结构建筑等领域的应用, 推动重组木产品向更广范围、更高层次应用, 促进产业进入新的发展阶段。

参考文献:

- [1] 林天成, 翟莲, 彭东俊. 国内外重组木的研究现状与发展趋势[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(3): 58-60.
LIN T C, ZHAI L, PENG D J. Research status and development trend of domestic and foreign scrimber[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2017, 39(3): 58-60.
- [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] Coleman J D. Reconsolidated wood product: US04232067A[P]. 1980-11-04.
- [4] 王恺, 肖亦华. 重组木国内外概况及发展趋势[J]. 木材工业, 1989, 3(1): 40-43.
WANG K, XIAO Y H. General situation and development trend of scrimber at home and abroad[J]. China Wood Industry, 1989, 3(1): 40-43.
- [5] 汪孙国. 国外两种重组木生产线介绍[J]. 木材工业, 1990, 4(2): 46-47, 45.
WANG S G. Introduction of two kinds of SCRIMBER production lines abroad[J]. China Wood Industry, 1990, 4(2): 46-47, 45.
- [6] 陈明及, 吴金绒, 陈晓轶, 等. 不同因素对竹柳枝桠材重组木性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 658-666.
CHEN M J, WU J R, CHEN X Y, et al. Properties of *Salix discolor* scrimber[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2016, 33(4): 658-666.
- [7] 李奇. 沙柳材混凝土模板的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [8] 阿伦. 沙柳材重组木的制造工艺研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
- [9] 于文吉. 我国重组竹产业发展现状与趋势分析[J]. 木材工业, 2012, 26(1): 11-14.
YU W J. Current status and future development of bamboo scrimber industry in China[J]. China Wood Industry, 2012, 26(1): 11-14.
- [10] 宋孝周, 陈达, 郭康权, 等. 农作物秸秆重组材工艺分析与研究展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 229-234.
SONG X Z, CHEN D, GUO K Q, et al. Technical analysis and prospect of crop straw scrimber[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(5): 229-234.
- [11] TIAN W, QIAN Y M, WANG R Z, et al. Tensile performance of a novel glue-laminated cornstalk scrimber[J]. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2020, 23(3): 198-203.
- [12] 金维洙, 马岩, 刘伟, 等. 不同树种构成的重组木力学性能的试验研究与分析[J]. 林产工业, 1998, 25(1): 24-26.
JIN W Z, MA Y, LIU W, et al. Experimental research and analysis of mechanical properties of scrimber made from different wood species [J]. China Forest Products Industry, 1998, 25(1): 24-26.
- [13] 梁艳君. 制造工艺对纤维化单板重组木性能影响规律的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [14] 张亚梅, 于文吉, 牛义. 浸胶法对桉树纤维化单板重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2015, 29(5): 17-19.
ZHANG Y M, YU W J, NIU Y. Effects of adhesive impregnating methods on properties of scrimber made from fibrous *Eucalyptus* veneers[J]. China Wood Industry, 2015, 29(5): 17-19.
- [15] 韦亚南, 魏金光, 张亚梅, 等. 浸胶量对杨木重组木物理力学及表面性能的影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(2): 11-15.
WEI Y N, WEI J G, ZHANG Y M, et al. Effect of resin content on the physical-mechanical and surface properties of poplar scrimber[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(2): 11-15.
- [16] 阿伦, 高志悦, 马岩. 施胶量和断面结构对沙柳材重组木性能的影响[J]. 林业科技, 2007, 32(2): 42-43.
A L, GAO Z Y, MA Y. Effects of resin content or cross-section structure on properties of *Salix* scrimber[J]. Forestry Science & Technology, 2007, 32(2): 42-43.
- [17] 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.
- [18] YU H X, FANG C R, XU M P, et al. Effects of density and resin content on the physical and mechanical properties of scrimber manufactured from mulberry branches[J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(2): 159-164.
- [19] 张亚梅, 余养伦, 李长贵, 等. 速生轻质木材制备高性能重组木的适应性研究[J]. 木材工业, 2016, 30(3): 41-44.
ZHANG Y M, YU Y L, LI C G, et al. Manufacturing technology and properties of scrimber made of low density wood[J]. China Wood Industry, 2016, 30(3): 41-44.
- [20] 马岩, 许琼晓, 许世祥. 重组木碾压疏解设备关键部件的设计与有限元分析[J]. 林产工业, 2016, 43(5): 10-14.
MA Y, XU Q X, XU S X. The structural design and the finite analysis of the key components of scrimber crushing and defibering equipment [J]. China Forest Products Industry, 2016, 43(5): 10-14.
- [21] 杜春贵. 杉木积成材制造中的梳解加工及产品特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [22] 马岩, 许琼晓, 许世祥, 等. 小径木刨切单板纤维化处理设备整机结构设计[J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 119-123.
MA Y, XU Q X, XU S X, et al. The structural design of small-diameter wood sliced veneer fibrosis treatment equipment[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(6): 119-123.
- [23] 余养伦, 于文吉. 新型纤维化单板重组木的主要制备工艺与关键设备[J]. 木材工业, 2013, 27(5): 5-8.
YU Y L, YU W J. Manufacturing technology of novel scrimber made of fibrosis of veneer[J]. China Wood Industry, 2013, 27(5): 5-8.
- [24] 陈云. 重组方材连续四面热压机的研发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [25] 张静. 桑枝重组方材热压工艺及性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [26] 胡玉安, 何梅, 王玉, 等. 樟树剩余物制备重组木工艺与性能研究[J]. 林业工程学报, 2016, 1(5): 36-39.
HU Y A, HE M, WANG Y, et al. Study on manufacturing process and performance of scrimber from residues of *Cinnamomum camphora*[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(5): 36-39.
- [27] Du C G, Yao X L, Hua Y T, et al. Preparation and characterization of combed sawmill slab residues from Chinese fir and its scrimber[J]. BioResources, 2018, DOI:10.15376/biores.13.4.8477-8487.
- [28] 商晓霞, 马岩, 张建华, 等. 国内外重组木研究近况及发展前景[J].

- 世界林业研究, 1998, 11(1): 38-43.
- SHANG X X, MA Y, ZHANG J H, et al. The status of scrimber research at home and abroad and the prospect of its development in China[J]. World Forestry Research, 1998, 11(1): 38-43.
- [29] 翟莲, 刘长安, 彭东旭, 等. 国内重组木发展中存在的问题及前景[J]. 四川建材, 2019, 45(1): 6, 8.
- ZHAI L, LIU C A, PENG D X, et al. Problems and prospects of domestic scrimber development[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(1): 6, 8.
- [30] 张亚慧, 韦亚南, 于文吉. 疏解单板厚度对杨木重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(1): 46-49.
- ZHANG Y H, WEI Y N, YU W J. Effect of crushed veneer thickness on poplar scrimber properties[J]. China Wood Industry, 2017, 31(1): 46-49.
- [31] LI Z, HE M, TAO D, et al. Experimental buckling performance of scrimber composite columns under axial compression[J]. Composites Part B, 2016, 86:203-213.
- [32] 韦亚南, 张亚梅, 于文吉. 浸胶方式对荷木重组木性能的影响[J]. 木材加工机械, 2016, 27(5): 29-31, 11.
- WEI Y N, ZHANG Y M, YU W J. Effects of adhesive impregnating manners on properties of *Schima superba* scrimber[J]. Wood Processing Machinery, 2016, 27(5): 29-31, 11.
- [33] 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.
- [34] 时萌蒙. 重组方材两种原材料疏解干燥工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [35] 梁艳君, 张亚慧, 余养伦, 等. 铺装方式对杨木重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(3): 40-43.
- LIANG Y J, ZHANG Y H, YU Y L, et al. Effect of strand mat forming on poplar scrimber properties[J]. China Wood Industry, 2017, 31(3): 40-43.
- [36] 邱学海, 梁星宇, 林雨斌, 等. 两种压制方法对杨木重组木性能的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(3): 40-43.
- QIU X H, LIANG X Y, LIN Y B, et al. Effects of two pressing methods on properties of poplar reconstituted wood[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2017, 45(3): 40-43.
- [37] 张亚慧, 张亚梅, 任丁华, 等. 高性能重组木制造工艺对其性能的影响[J]. 木材工业, 2016, 30(5): 31-34.
- ZHANG Y H, ZHANG Y M, REN D H, et al. Effect of manufacturing technology on scrimber performance[J]. China Wood Industry, 2016, 30(5): 31-34.
- [38] 魏金光, 韦亚南, 鲍敏振, 等. 辐射松重组木密度对其孔隙率和性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 519-523.
- WEI J G, WEI Y N, BAO M Z, et al. Effect of density on porosity and physical-mechanical properties of highperformance scrimbers[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, 35(3): 519-523.
- [39] 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.
- [40] 余养伦, 周月, 于文吉. 密度对桉树纤维化单板重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2013, 27(6): 5-8.
- YU Y L, ZHOU Y, YU W J. Effect of density on properties of scrimber made of fibrosis of *Eucalyptus* veneer[J]. China Wood Industry, 2013, 27(6): 5-8.
- [41] BAO M Z, LI N, HUANG C J, et al. Fabrication, physical-mechanical properties and morphological characterizations of novel scrimber composite[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(5): 741-747.
- [42] WEI J G, LIN Q Q, ZHANG Y H, et al. Surface properties of pine scrimber panels with varying density[J]. Coatings, 2019, 9(6): 397.
- [43] 王进峰. 旋切机工作原理及技术特点[J]. 吉林农业, 2016(14): 68-69.
- WANG J F. Working principle and technical characteristics of rotary cutting machine[J]. Jilin Agricultural University, 2016(14): 68-69.
- [44] FU B, LI X G, YUAN G M, et al. Preparation and flame retardant and smoke suppression properties of bamboo-wood hybrid scrimber filled with calcium and magnesium nanoparticles[J]. Journal of Nanomaterials, 2014, DOI:10.1155/2014/959135.
- [45] 杨思瑞. 酚醛树脂的增韧改性及杨木重组木性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.

(本文编校 孟凡丹)

(上接第16页)

- Technologies, 2019, 38(9): 153-156.
- [54] 郭慧, 王霄, 刘传泽, 等. 基于灰度共生矩阵和分层聚类的刨花板表面图像缺陷提取方法[J]. 林业科学, 2018, 54(11): 111-120.
- GUO H, WANG X, LIU C Z, et al. Research on defect extraction of particleboard surface images based on gray level co-occurrence matrix and hierarchical clustering[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(11): 111-120.
- [55] JI X Y, GUO H, HU M H. Features extraction and classification of wood defect based on hu invariant moment and wavelet moment and BP neural network[C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction, 2019: 1-5.
- [56] 罗微, 孙丽萍. 利用局部二值模式和方向梯度直方图融合特征对木材缺陷的支持向量机学习分类[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(6): 70-73.
- LUO W, SUN L P. Wood defect detection and classification by fusion feature and support vector machine[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(6): 70-73.
- [57] 杨旭. 木材加工自动化中的板材缺陷检测技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [58] 王泽润. 基于颜色与纹理特征的木材表面缺陷识别方法[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [59] 车志勇. 基于线性判别分析(FDA)的迁移学习方法[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [60] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [61] 马旭, 刘应安, 业宁, 等. 基于核PCA与SVM算法的木材缺陷识别[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 60-68.
- MA X, LIU Y G, YE N, et al. Application of KPCA and SVM to wood defect recognition[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2017, 29(3): 60-68.
- [62] Kamal K, Qayyum R, Mathavan S, et al. Wood defects classification using laws texture energy measures and supervised learning approach[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 34: 125-135.
- [63] YU H L, LIANG Y L, LIANG H, et al. Recognition of wood surface defects with near infrared spectroscopy and machine vision[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(6): 2379-2386.

(本文编校 向琴)