北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备重组木及其性能

张亚梅 周云霞 祝荣先 于文吉

Wood scrimber preparation and its performance by roller-pressing resin impregnation method for recombinant units with high-moisture content

Zhang Yamei, Zhou Yunxia, Zhu Rongxian, Yu Wenji

引用本文:
张亚梅, 周云霞, 祝荣先, 于文吉. 高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备重组木及其性能[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):167–176. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250032
Zhang Yamei, Zhou Yunxia, Zhu Rongxian, Yu Wenji. Wood scrimber preparation and its performance by roller–pressing resin impregnation method for recombinant units with high–moisture content[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):167–176. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250032

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250032

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

辊压树脂浸胶法对桉木重组木尺寸稳定性影响机理
Influence mechanism of roller–press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 141–151. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230206

基于微创预处理的重组木防霉防腐性能
Anti–mildew and anti–corrosion performance of wood scrimber based on minimally invasive pretreatment
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 127–136. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240087

MFAPP制备阻燃浸渍纸及其在饰面高密度纤维板中的应用
Preparation of flame retardant impregnated paper by MFAPP and its application on veneered high–density fiberboard
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 134–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230196

金中都水关遗址木结构含水率及其影响因素
Moisture content and its influencing factors of wood structures at Shuiguan Site in Jinzhongdu Watergate Site of Beijing
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 143–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220499

季铵化纳米纤维素增强预油漆纸性能
Properties of finish foil enhanced by quaternized nanocellulose
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 145–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230281

北京地区8种树种枯死可燃物含水率预测模型及变化规律
Prediction models and changing rules of dead fuel moisture content of 8 forest species in Beijing area
北京林业大学学报, 2020, 42(6): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190370

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250032

高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备重组木及其性能

张亚梅　周云霞　祝荣先　于文吉
（中国林业科学研究院木材工业研究所，北京，100091）

摘要:【目的】重组木的传统施胶工艺存在劳动强度大，干燥耗能高，难以实现连续化生产等技术瓶颈。针对这些问题，本研究创新性地采用辊压树脂浸渍法，直接对高含水率的重组单元进行施胶。通过系统地探究该方法对重组木物理力学性能的影响，为生产工艺的优化提供理论依据。**【方法】**采用辊压树脂浸渍技术，直接对含水率为 30% 的杨木重组单元施加酚醛树脂，并通过调控压缩率和辊压次数优化施胶量控制工艺。利用微计算机断层扫描仪、扫描电子显微镜、透射电镜表征胶液分布和微观形貌，通过红外光谱仪和 X 射线衍射仪解析树脂与木材界面之间的化学作用机制。此外，采用煮沸–干燥–煮沸循环测试法评估重组木的耐水性能，并通过三点弯曲测试法评估其力学性能。**【结果】**辊压压力和辊压次数的增加可显著提升高含水率重组单元的施胶量。与传统吊笼式浸胶法制备的重组木相比，辊压树脂浸渍法制备的重组木的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率分别降低了 41.12% 和 21.04%，弹性模量（MOE）增大了 10.57%。辊压压力促使重组单元中的细胞裂隙扩展，胶液在负压作用下渗透至细胞腔及细胞壁内部，并与纤维素发生交联。化学分析进一步证实，酚醛树脂填充了细胞间隙并形成了三维网状结构，从而抑制木材吸湿膨胀，提升密实度与结晶度。因此，该技术使得胶液在重组单元中的分布更加均匀，显著提高了重组木的耐水性能，抑制了木材细胞吸水后的回弹现象，减少了重组木表面的“跳丝”现象，提高了板材整体性能的均匀性。同时，渗透到细胞壁中的酚醛树脂增强了重组木的 MOE。**【结论】**高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术通过优化胶液分布与界面结合，显著提升了重组木的耐水性和 MOE。同时，该技术省去了干燥工序，有效降低了能耗。这一技术突破为实现重组单元的疏解—浸渍—干燥连续化生产提供了可行路径，为重组木生产工艺的优化和可持续发展提供了新思路和方法。

关键词：高含水率重组单元；辊压树脂浸渍法；重组木；连续化生产；耐水性能；弹性模量 (MOE)
中图分类号：TS652　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)07−0167−10
引文格式：张亚梅，周云霞，祝荣先，等. 高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备重组木及其性能［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：167−176. Zhang Yamei, Zhou Yunxia, Zhu Rongxian, et al. Wood scrimber preparation and its performance by roller-pressing resin impregnation method for recombinant units with high-moisture content［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 167−176.

Wood scrimber preparation and its performance by roller-pressing resin impregnation method for recombinant units with high-moisture content

Zhang Yamei　Zhou Yunxia　Zhu Rongxian　Yu Wenji
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: ［**Objective**］ The traditional adhesive application process for wood scrimber is labor-intensive, energy-consuming in drying, and difficult to scale up for continuous production. To address these issues, this paper innovatively employs a roller-pressing resin impregnation method to directly apply resin to units with

收稿日期: 2025−01−25　**修回日期:** 2025−07−02
基金项目: 国家重点研发计划（2021YFD2200601）。
第一作者: 张亚梅，副研究员。主要研究方向：木质重组材料性能优化与应用技术研究。Email：zhangyamei@caf.ac.cn，　地址：100091 北京市海淀区青龙桥街道香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。
责任作者: 祝荣先，副研究员。主要研究方向：重组材料制备与技术推广。Email：zhurongxian@caf.ac.cn，　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

high moisture content. The paper systematically investigates the impact of this method on the physical and mechanical properties of wood scrimber, providing theoretical support for optimizing the production process. [**Method**] Using roller-pressing resin impregnation technology, phenol-formaldehyde (PF) resin was directly applied to poplar units with 30% moisture content. The PF resin application process was optimized by adjusting the compression ratio and the number of roller-pressing. The distribution of resin and microstructure was characterized using micro-computed tomography, scanning electron microscopy, and transmission electron microscopy. The chemical interactions between resin and wood were analyzed using Fourier-transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction. Additionally, the water resistance of wood scrimber was evaluated using a boiling-drying-boiling cycle test, and its mechanical properties were assessed using a three-point bending test. [**Result**] Increasing roller pressure and the number of presses significantly enhanced resin application in high-moisture-content units. Compared with wood scrimber produced by traditional cage-type impregnation method, the wood scrimber produced by roller-pressing impregnation method exhibited 41.12% and 21.04% reductions in thickness swelling rate and width swelling rate, respectively, along with a 10.57% increase in modulus of elasticity (MOE). The roller pressure caused further damage to the cells within the units, and the expansion of pre-existing cracks, allowing resin to penetrate into the cell cavities and cell walls under negative pressure, forming cross-links with cellulose. Chemical analysis further confirmed that PF resin filled intercellular spaces and established a three-dimensional network structure, which inhibited hygroscopic swelling and enhanced its density and crystallinity. Consequently, this technology achieved more uniform resin distribution within units, substantially improving the water resistance of wood scrimber, and inhibited cell wall spring-back upon water absorption, reduced surface bulging (jump fibers), and enhanced overall board homogeneity. Moreover, the phenolic resin that penetrated the cell walls enhanced the MOE of reconstituted wood. [**Conclusion**] The roller-pressing resin impregnation technology for high-moisture-content units significantly enhances the water resistance and modulus of elasticity (MOE) of wood scrimber by optimizing resin distribution and interfacial bonding. Simultaneously, this technology also reduces energy consumption by eliminating conventional drying process before gluing process. This technological breakthrough enables continuous fiber separation-impregnation-drying production workflows, providing novel approaches for optimizing manufacturing processes and promoting the sustainable development in wood scrimber.

Key words: recombinant units with high moisture content; roller-pressing impregnation method; wood scrimber; continuous production; water resistance; modulus of elasticity (MOE)

随着全球木材资源的日益短缺以及对木材性能要求的不断提高，开发高性能木质复合材料成为木材科学与工程领域的重要研究方向。重组木作为一种新型高性能木质复合材料，通过定向重组技术将纤维化重组单元与树脂结合，可显著改善人工林木材径级小、材质软、强度低等缺陷，实现低质木材的高值化利用[1]。凭借这些优势，重组木在家具、地板、建筑、交通和景观等领域具有广阔的应用前景。因此，其相关研究不仅具有重要的科学价值，还对推动木材资源的可持续利用和相关产业的发展具有深远的现实意义。

在传统的重组木制备工艺中，重组单元需要经过干燥、施胶、二次干燥、组坯成型等多道工序。其中，施胶工序主要采用吊笼式浸胶法，该方法要求重组单元施胶前的含水率控制在 10% 以下，这一要求导致干燥耗能高，周期长，且难以实现疏解–浸渍–干燥的连续化生产，存在劳动强度大，效率低等瓶颈问题。

为了突破传统工艺的限制，近年来，辊压树脂浸渍技术作为一种新兴的施胶方法受到了广泛关注。该技术通过机械压力将树脂定向导入重组单元中，不仅能够显著提升重组材的尺寸稳定性[2]、力学性能[3−4]和阻燃性能[5]，还可以与后续的干燥工艺形成连续化生产，从而有效提高生产效率，降低劳动强度。然而，现有研究多聚焦于低含水率（< 10%）重组单元的辊压树脂浸渍工艺，而疏解后的重组单元初始含水率通常在 30% 以上。若直接沿用传统的干燥工艺将重组单元的含水率降至 10% 以下，不仅会增加干燥能耗，还会阻碍疏解–浸渍–干燥的连续化生产。因此，开发适用于高含水率重组单元的辊压树

脂浸渍技术，对于优化重组材制备工艺，降低能耗，提升生产效率具有重要意义。

在重组材制备领域，本研究首次将辊压树脂浸渍技术应用于含水率 30% 的重组单元，系统性地探索该技术对重组木性能的影响机制。本研究选用速生林杨木作为原材料，酚醛树脂作为胶黏剂，利用辊压树脂浸渍技术，以 30% 含水率的重组单元制备重组木。研究将重点关注含水率重组单元施胶量的控制工艺，并深入探究辊压树脂浸渍技术对重组单元形貌、树脂在重组单元和重组木中的分布以及重组单元化学成分的影响。此外，还将研究该技术对重组木耐水性能和力学性能的影响。本研究旨在揭示高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术对重组木性能的影响机理，并为重组木制备过程中施胶–干燥阶段的连续化生产提供重要的技术参考。

1　材料与方法

1.1　材　料

大青杨（*Populus ussuriensis*）产自江苏邳州，胸径为 18～20 cm，15 年生。酚醛树脂（phenol-formaldehyde resin，PF）胶黏剂购自爱克太尔新材料（广东）有限公司，固含量 49.47%，黏度 67.5 Pa·s（25 ℃），水溶倍数为 20 倍，pH 值为 9.71。

1.2　重组木制备方法

木材首先被旋切成厚度为 4 mm 的单板，然后通过疏解设备处理成纤维化木单板，并分别干燥至含水率 30% 和 9%。对 30% 含水率的重组单元，采用优化后的辊压树脂浸渍法进行施胶，获得高含水率重组单元辊压树脂浸胶法制备的重组木 RWS；对 9% 含水率的重组单元，则使用吊笼式浸胶法施胶作为对照，获得吊笼式浸胶法制备的重组木 CWS。施胶后的重组单元进一步干燥至含水率 10% ～ 12%，之后通过热压法完成重组木的制备。热压工艺参数如下：热压温度 150 ℃，热压时间 1.10 min/mm，热压压力 3～4 MPa。制备的重组木尺寸为 450 mm（长）× 160 mm（宽）× 20 mm（厚），密度为 1.00 g/cm^3。重组木的制备工艺流程如图 1 所示。

在本实验中，重组木的密度控制方法如下：利用模具对重组木进行热压成型，通过设定热压成型后的最终尺寸和目标密度，计算出重组木材料所需的理论质量。同时，考虑到热压过程中可能会有水分损失，我们在理论质量基础上加上相应的损失量，从而确定材料的实际铺装质量。将制备好的重组木在自然环境中平衡两周后，进行裁边和砂光处理，以备后续使用。最终成品板的含水率约为 8%。

1.2.1　辊压树脂浸渍法以及施胶量控制

采用辊压树脂浸渍法对含水率为 30% 的木单元进行施胶处理。该方法流程与常规辊压树脂浸渍法相同，但通过调节单元压缩率和辊压次数精确控制施胶量。

辊压树脂浸渍过程中，压缩率和辊压次数是影响重组单元施胶量的重要因素。压缩率是辊压压力的表征指标，压缩率越小，辊压压力相应减小；随着压缩率的增加，辊压压力逐渐增大。辊压次数，是指将重组单元在压辊间隙不变的情况下辊压不同的次数。研究压缩率和辊压次数对重组单元施胶量的影响，对高含水率重组单元施胶工艺的优化具有重要的作用。基于本课题组前期的研究，本研究采用 30% ～ 70% 的压缩率和 1 ～ 3 次辊压处理对重组单元进行树脂浸渍。实验条件的设定旨在确保对重组单元的影响最小化，从而不干扰后续的铺装成型工艺。

具体操作如下：将固含量 18% 的酚醛树脂胶液倒入辊压机胶槽，使下压辊完全浸没，上压辊 1/3 浸没。单元压缩率（C，%）和施胶量（P，%）分别按式（1）和（2）计算。辊压树脂浸渍时，设定线速度 15 m/min，重组单元辊压间隔时间 8 s。计算得出：在 70% 压缩率下，经 3 次辊压浸渍，重组单元施胶量可达 17% ～ 18%。

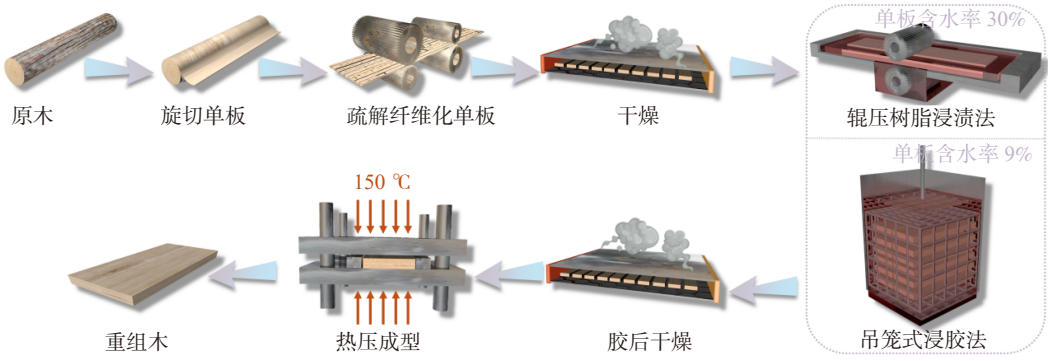


图 1　重组木的制备工艺示意图

Fig. 1　Schematic illustration of wood scrimber preparation

$$C = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：T_0 为辊压前单元的厚度(mm)，T_1 为辊压过程中单元的厚度(mm)。

$$P = \frac{(m_1 - m_0) \times S}{m_0 \times (1 - M)} \times 100\% \quad (2)$$

式中：m_0 为单元施胶前质量(g)，m_1 为单元施胶后质量(g)，S 为胶液固含量(%)，M 为单元施胶前含水率(%)。

1.2.2 吊笼式浸胶法

将含水率为 9% 的疏解木单板浸入固含 18% 的胶液中，保持浸渍 5 min，随后取出并沥胶 5 min，以去除表面多余的胶液。单元施胶量的计算如式(2)所示，根据该公式计算得到的单元施胶量为 17% ~ 18%。

1.3 性能表征

1.3.1 胶液的分布

为了深入研究胶液在单元中的渗透和分布情况，本研究采用多种显微技术进行观察。首先，制备了 Br 标记的酚醛树脂胶(Br-PF)作为胶黏剂。为了避免疏解过程对重组单元造成破坏，本研究选择以未经疏解的 1.70 mm 厚的旋切杨木单元为研究对象。将这些单元分别干燥至 30% 和 9% 的含水率。其中，30% 含水率的单元采用辊压树脂浸渍法施胶，而 9% 含水率的单元则采用吊笼式浸胶法施胶。施胶后的单元在 130 ℃ 烘箱中干燥 20 min，以使胶液固化。随后，利用微计算机断层扫描设备(micro-computed tomography，Micro-CT，Skyscan1172，比利时 Bruker)对单元进行扫描，并对图像进行分析，以观察 Br-PF 在单元中的渗透和分布情况。

进一步地，采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM，Hitachi-4800，日本日立)观察施胶后重组单元的形貌变化和胶液分布情况。此外，为了更细致地研究胶液在重组木中的分布，将杨木和重组木软化后，采用 Spurr 树脂进行包埋，然后利用超薄切片机(UC6，LEICA，德国)切取 70 nm 厚的横切片。最后，通过冷场发射透射电镜(FEI Tecnai G2 F30，美国)观察胶液在重组木中的分布情况。

1.3.2 重组单元施胶前后化学成分

将辊压树脂浸渍后的重组单元置于 130 ℃ 的烘箱中进行固化处理，以确保胶液充分固化。随后，采用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR)分析施胶后重组单元的化学成分变化，并利用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction，XRD，D8 Advance，德国)研究重组单元的结晶结构。具体而言，利用 FTIR 分析施胶前后重组单元化学成分的变化。采用 KBr 压片法制备样品，测试波数范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1}。通过 OMIC 8.0 软件对红外谱图进行自动基线校正，以提高数据的准确性。每个样品重复测试 3 次，最终结果取平均值。

此外，采用 XRD 对施胶后重组单元的结晶区进行分析。使用 Ni 滤波片，Cu 靶 Kα 射线(λ = 0.154 060 nm)，管电压 40 kV，管电流 40 mA，扫描范围(2θ)为 5° ~ 45°，扫描速度为 2(°)/min，步长为 0.02°。利用 Origin 软件对样品的衍射强度曲线进行高斯(Gaussian)拟合，并根据式(3)计算样品的结晶度。同样，每个样品重复测试 3 次，最终结果取平均值。

$$I_{Cr} = \frac{A_{10\bar{1}} + A_{002} + A_{110} + A_{101}}{A_{10\bar{1}} + A_{002} + A_{110} + A_{101} + A_{am}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：I_{Cr} 为相对结晶度，%；A 为不同区域的拟合面积，衍射角 2θ 在 16°、22°附近分布分别对应于结晶区($10\bar{1}$)、(002)，在 35°附近分布对应于结晶区(110)和(101)。衍射角 2θ 在 18°附近对应于纤维素的无定形区[6]，基于结晶区(002)峰的位置。利用 Scherer 公式计算结晶区长度或宽度和晶面层间距[7]。

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4)$$

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (5)$$

式中：D 为结晶区长度或宽度(nm)；d 为晶面层间距(nm)；λ 为入射波波长，取值 0.154 nm；β 为衍射峰半宽(°)；θ 为衍射角(°)；K 为衍射常数，取值 0.89。

1.3.3 重组木耐水性能

重组木的耐水性能是其尺寸稳定性的重要表征。测试高含水率重组单元辊压树脂浸胶技术制备的重组木的耐水性能，以吊笼式浸胶法制备的重组木作为对照样。参照 LY/T 3328—2024《重组木》，采用煮沸–干燥–煮沸处理测试法(即沸水煮 4 h，63 ℃ 干燥 20 h，沸水煮 4 h)对重组木进行测试，测定其吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率。每个测试条件分别进行 6 次重复试验，最终结果取平均值。采用 Spass 软件对所得数据进行方差分析，以确定两种不同施胶方法制备的重组木耐水数据差异的显著性。测试完成后，为评估重组木材料的形貌破坏程度，采用超景深显微镜(ultra-depth microscope，UDM)对耐水测试后的重组木样品的表面形貌进行观察；使用滑走切片机将处理后的试件横切面切平，并均匀喷金处理，随后，采用 SEM 观察样品的微观构造。

1.3.4 重组木力学性能

根据 LY/T 3328—2024《重组木》标准，利用万能

力学试验机（ETM 105D，深圳万测）对重组木进行力学性能测试，主要测定其静曲强度（modulus of rupture，MOR）和弹性模量（modulus of elasticity，MOE）。采用三点弯法测试两种重组木的 MOR 和 MOE。每个条件分别测试 6 个试件，最终结果取平均值。采用 Spass 软件对所得数据进行方差分析，以确定两种不同施胶方法制备的重组木力学性能数据差异的显著性。测试完成后，采用 SEM 对力学测试后的重组木样品的微观构造进行观察，以分析其破坏机理。

2　结果与讨论

2.1　高含水率重组单元辊压树脂浸渍法中施胶量的控制

在辊压次数相同的情况下，重组单元的施胶量随着压缩率的增大而逐渐增加（图 2）。辊压 1 ~ 3 次时，设定压缩率 30% 时，重组单元的施胶量为 11.25% ~ 16.04%；设定压缩率 70% 时，重组单元的施胶量为 13.32% ~ 17.82%。这主要是因为木材的细胞壁在高含水率状态下会因为水的塑化作用而变得更加柔软[8]，使得木材在受到压力作用时更容易发生压缩。压缩率越大，重组单元在压力的作用下产生的变形也越大；当压力消失后，在形变回复过程中产生的负压也越大，从而促进了胶液向重组单元中的渗透。

在相同的压缩率下，随着辊压次数的增加，重组单元的施胶量呈现出逐渐增大的趋势。当压缩率为

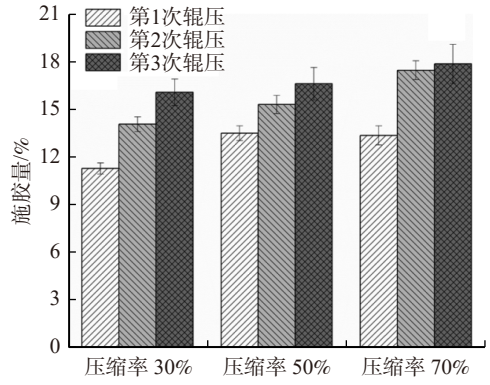


图 2　压缩率和辊压次数对高含水率重组单元施胶量的影响

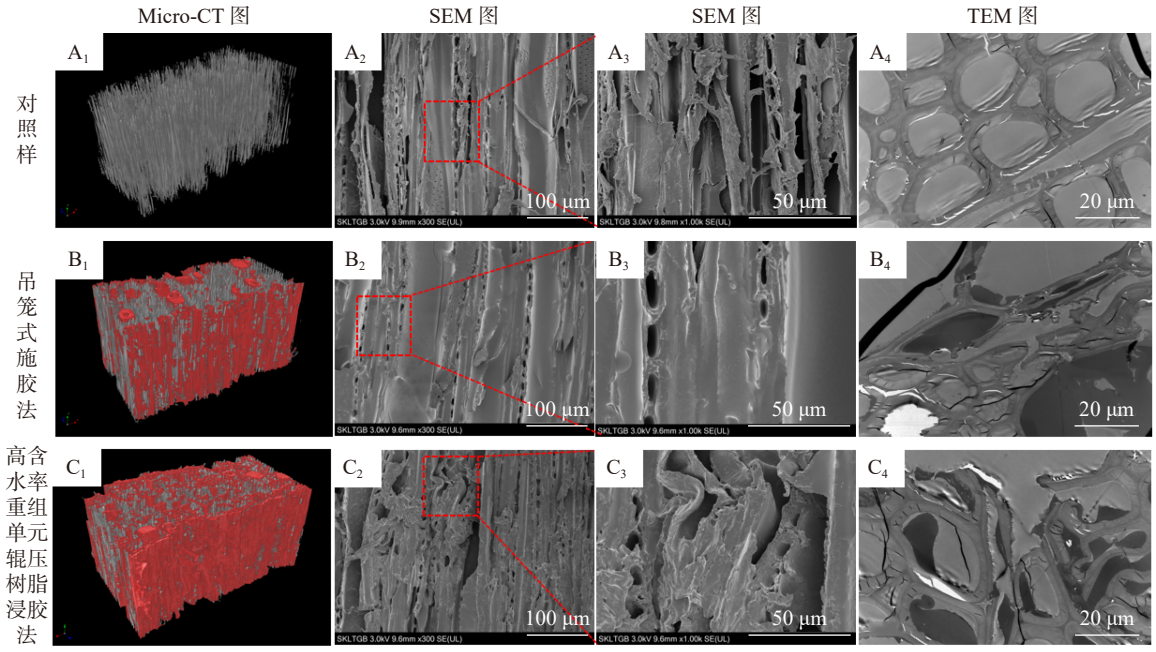
Fig. 2　Effects of compression rate and rolling times on the amount of adhesive applied to high moisture content recombinant units

30% ~ 70% 时，设定 1 次辊压时，重组单元的施胶量为 11.25% ~ 13.32%；设定 3 次辊压时，重组单元的施胶量为 16.04% ~ 17.82%。重组单元施胶量随着辊压次数的增多而增大，主要是由于辊压压力对重组单元的破坏增加了胶液的渗透路径，以及施胶过程中产生的负压作用使得重组单元吸附的胶量增多。

因此，高含水率重组单元施胶量的控制，可通过调节辊压树脂浸渍过程中重组单元压缩率和辊压次数来实现。

2.2　辊压树脂浸渍法对高含水率重组单元形貌和胶液渗透通道的影响

分别采用 Micro-CT、SEM 和 TEM 观察重组单元和重组木中的胶液分布，结果如图 3 所示。吊笼式浸胶法施胶的重组单元中，胶液主要分布在重组



图中灰色的部分代表木材，红色的部分代表胶液。

图 3　重组单元中胶液分布

Fig. 3　Distribution of PF resin in the recombinant units

单元的上下表面及旋切产生的裂隙中，且部分导管中也出现了胶液的聚集(图 3B$_1$)。这主要是因为吊笼式浸胶法施胶过程中，重组单元中胶液的吸附主要依靠短时间内自由吸附的作用。与吊笼式浸胶法相比，30% 含水率重组单元经辊压树脂浸渍后，胶液在单元中的分布更加均匀，这是因为重组单元在辊压树脂浸渍过程中，单元在辊压压力作用下导致裂隙在厚度方向进一步扩展，增加了胶液的渗透通道；同时，30% 含水率的单元接近木材的纤维饱和点，水分主要集中在细胞壁中，而细胞腔中的自由水很少，水分对细胞壁具有软化的作用，在辊压压力的作用下更容易发生变形。在辊压压力的作用下，木材厚度方向的尺寸在宏观上变小，微观上则表现为细胞腔和细胞间隙被压扁，使得部分空气被挤出木材；当外力消失时，被压扁的细胞腔和细胞间隙趋向恢复到原来的形状和尺寸，这导致木材内部产生负压，从而有助于酚醛树脂胶液进入木材的导管和纤维细胞中，使得胶液在单元中的分布更加均匀(图 3C$_1$)。

通过 SEM 观察可知，采用吊笼式浸胶法施胶的单元，胶液主要附着在细胞的表面；而高含水率重组单元辊压树脂浸渍后，胶液向导管和纤维细胞的细胞壁内部渗透，胶液渗透到细胞壁上的纹孔中，进入木材细胞壁的 S3 层。这是因为在高含水率下，木材细胞壁的塑化作用增强，水分的存在通过氢键作用削弱木质素−多糖复合体的相互作用，导致细胞壁黏弹性降低[9]。这种塑化作用使得细胞壁的微观结构发生变化，孔隙率增加[10]，这种结构的改变促进树脂分子更易进入木材内部。此外，在辊压浸渍过程中重组单元上下表面临近的部位产生破坏，部分导管和纤维细胞在辊压压力的作用下出现了褶皱变形的现象，这些破坏增加了胶液的渗透路径。然而，辊压树脂浸渍过程并未使纤维细胞发生断裂。这是因为：当重组单元的含水率在纤维饱和点附近时，水分使得细胞壁中纤维的间距增大，从而增加了木材的柔韧性和抗破坏能力[11]。

采用 TEM 在微米级水平观察胶液在重组木中的分布。在采用吊笼式浸胶法制备的重组木中，胶液主要填充并聚集在部分细胞腔内，而未被破坏的细胞则未填充胶液。相比之下，采用高含水率重组单元辊压树脂浸渍法施胶时，胶液能够进入木材的导管和纤维细胞的 S3 层，从而使胶液在重组木中的分布更加均匀。

2.3 辊压树脂浸渍法对高含水率重组单元化学成分的影响

2.3.1 重组单元辊压树脂浸渍前后的化学成分分析

施胶后的重组单元在 3 426 cm^{-1} 处的羟基(—OH)伸缩振动峰变窄，在 2 923 cm^{-1} 处吸收峰变宽；1 039 cm^{-1} 处的吸收峰主要与纤维素和半纤维素中的 C—O 伸缩振动有关，施胶后重组单元中此吸收峰的强度增大(图 4)。这主要是因为酚醛树脂分子填充了木材细胞腔隙或附着在细胞壁上，改变了木材的化学结构[12]，从而改变了特征峰的宽度和强度。

1 736 cm^{-1} 处为非共轭乙酰基中的羰基(C═O)伸缩振动峰，施胶后重组单元中此峰的强度增大。这主要是由于酚醛树脂为碱性溶液，辊压树脂浸渍过程中酚醛树脂会在辊压压力的作用下进入木材的细胞壁中，而细胞壁的主要组分——纤维素和半纤维素在碱性溶液中易发生剥皮和降解反应，生成新的 C═O 化合物[13]，从而会使施胶后重组单元中的羰基含量升高。1 636 cm^{-1} 为共轭羰基(C═O)的伸缩振动峰，施胶后重组单元中的此峰消失，这主要是由于酚醛树脂与木材主要成分发生反应导致，如苯酚和甲醛与木质素的交联反应。施胶后单元中 1 610 和 1 590 cm^{-1} 处的吸收峰的增强，这主要是由酚醛树脂分子中的苯环骨架振动和 C═O 键的振动引起。1 425 cm^{-1} 处的吸收峰主要与木质素的芳香骨架振动有关，施胶后重组单元中此峰的强度降低，这主要是由于酚醛树脂分子填充了木材细胞腔隙或附着在细胞壁上，减少了—OH 和 C═O 相对含量，从而导致芳香环骨架伸缩振动吸收峰的减弱。

2.3.2 重组单元辊压树脂浸渍前后纤维素结晶度和晶格参数分析

采用 XRD 研究施胶前后的重组单元，并获得胶液固化后的纤维素结晶度和晶格参数，以杨木作为对照样。XRD 图谱和采用高斯函数模型拟合的曲线，如图 5 所示；纤维素结晶度和根据(200)晶面结晶指数以及公式得到的结晶参数，如表 1 所示。

与杨木相比，施胶后重组单元的结晶度增大，增大幅度约 2.19%；(200)晶面衍射峰的位置集中在 22°附近，与原木相比未发生变化；施胶后重组单元的结晶区半峰宽降低，结晶区宽度变大，而结晶区的

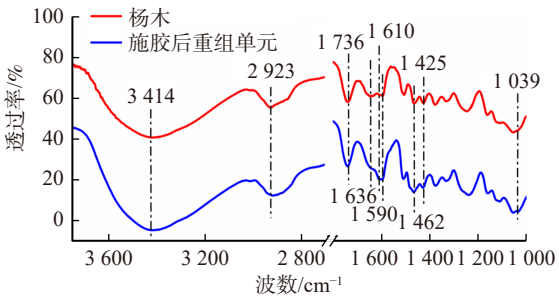


图 4 施胶前后重组单元的红外谱图

Fig. 4 FTIR of the recombinant units before and after resin treating

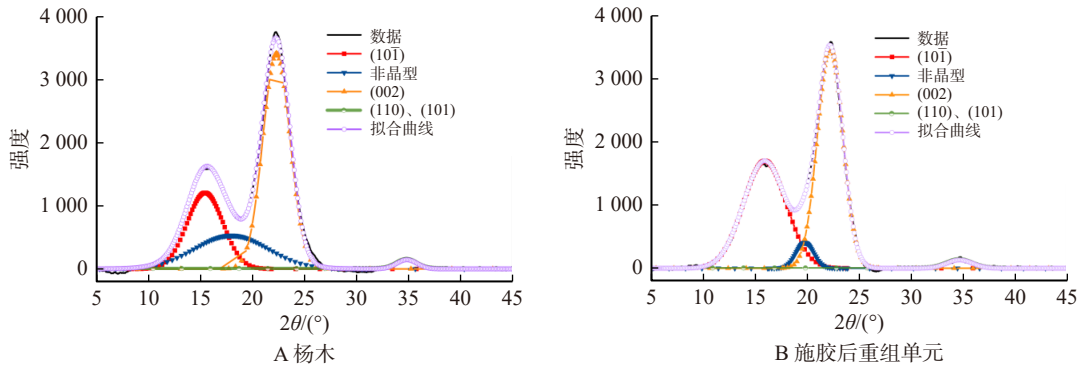


图 5　施胶前后重组单元结晶参数拟合曲线

Fig. 5　Fitting curves of crystallization parameters of recombinant units before and after resin treating

表 1　施胶前后重组单元结晶参数变化

Tab. 1　Variation of crystallization parameters of recombinant units before and after resin treating

材料	结晶指数/%	衍射角/(°)	半峰宽/cm^{-1}	结晶宽度/nm	层间距/nm
杨木	78.99	22.29	4.04	0.036	0.203
施胶后重组单元	80.72	22.13	3.11	0.047	0.204

层间距变化不大，这说明酚醛树脂只能达到纤维素的非结晶区，不能进入纤维素的结晶区，主要影响木材的非结晶区域。重组单元在辊压树脂浸渍过程中，在辊压压力和水分的作用下，酚醛树脂进入到木材的细胞壁中，在固化过程中会与木材中的主要成分发生交联反应，形成三维网状结构，这种交联反应会提高纤维素的结晶度；同时，酚醛树脂会填充木材细胞壁中的空隙，提高木材整体的密实度，也有助于提高纤维素的结晶度[14]。Zeng 等[15]研究表明：酚醛树脂可通过改变木材的内部结构和化学组成来影响纤维素的结晶度，进而改善木材的物理和力学性能。

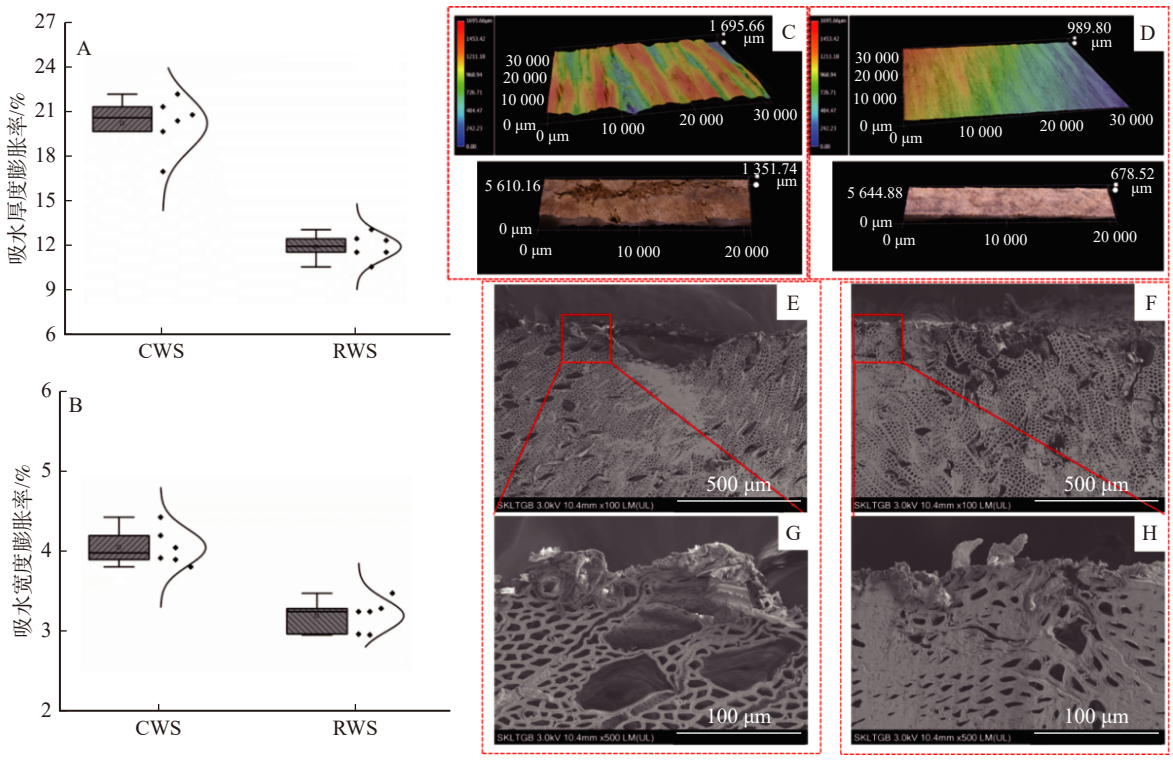
在高含水率(30%)条件下，辊压树脂浸渍过程中，重组单元细胞壁中的水分通过氢键作用软化细胞壁结构，导致微纤丝间孔隙扩大。虽然酚醛树脂分子量大于水分子，但其碱性环境能够促使细胞壁中的半纤维素等多糖组分发生部分降解(如 FTIR 分析中 1 736 cm^{-1} 处羰基峰增强所示)，从而在细胞壁内形成临时渗透通道。结合辊压工艺的机械压力作用，树脂分子进一步渗入细胞壁的非结晶区域，并通过 TEM 观察证实其渗透深度可达到 S3 层。上述结果表明，酚醛树脂不仅能够有效填充在细胞腔中，还能够在辊压压力的作用下渗透到细胞壁内部，并与细胞壁中的纤维素、半纤维素等主要化学成分发生交联反应(如 XRD 分析显示结晶区层间距保持稳定且结晶度提升 2.19%)。

2.4　高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备的重组木的耐水性能

在密度和施胶量相同的情况下，RWS 和 CWS 的吸水厚度膨胀率分别为 11.93% 和 20.26%，吸水宽度膨胀率分别为 3.19% 和 4.04%。相对于 CWS，RWS 的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率的降低幅度分别达到 41.12% 和 21.04%(图 6A，B)。这说明采用高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术制备的重组木的耐水性提高，尺寸稳定性得到改善。此外，吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率测试数据的分布图(图 6A、B)显示：相对于 CWS，RWS 测试的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率数据分布更为集中，而 CWS 测试的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率数据离散性较大。这表明高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术制备的重组木板材的性能更均匀，不同部位的差异较小。通过方差分析(表 2)可知，两种施胶方法制备的重组木的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率在 0.001 水平上差异显著。

综上可知，高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备的重组木的耐水性增强。主要原因在于：此施胶法使得重组单元中的胶液分布更加均匀，胶液进入木材的导管和纤维细胞的细胞腔中，并附着在细胞壁上，在成型过程中木材细胞压缩密实，并与树脂形成有效的胶合；同时，胶液在辊压压力的作用下向细胞壁内渗透，在细胞壁中形成更多的胶合位点，从而使得重组木的耐水性增强。

CWS 样品经耐水测试后出现开裂、变形等现象(图 6C)；而 RWS 经耐水测试后表面相对平整，未发现明显的跳丝现象(图 6D)。CWS 样品的开裂和变形主要出现在导管和纤维细胞部位(图 6E、G)，这主要是由于木材细胞缺胶或胶层失效引起，缺胶或胶层失效的导管和纤维细胞的细胞壁中含有大量的吸



RWS 代表高含水率重组单元辊压树脂浸胶法制备的重组木; CWS 代表吊笼式浸胶法制备的重组木。下同。A. 吸水厚度膨胀率; B. 吸水宽度膨胀率; C, E, G. CWS 测试后的形貌; D, F, H. RWS 测试后的形貌; C, D. UDM 图; E, F, G, H. SEM 图。

图 6 重组木吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率结果及其测试后的破坏形貌

Fig. 6 Results of thickness swelling rate and width swelling rate of wood scrimber and their failure morphology after testing

表 2 重组木的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率方差分析

Tab. 2 Variance analysis for thickness swelling rate and width swelling rate of wood scrimber

性能	类别	平方和	df	均方	*F*	*p*
吸水厚度膨胀率	组间方差	208.00	1	208.00	102.24	< 0.001
	误差	20.35	10	1.03		
	总计	228.35	11			
吸水宽度膨胀率	组间方差	2.18	1	2.18	46.71	< 0.001
	误差	0.47	10	0.05		
	总计	2.64	11			

湿性官能团，水分子易与细胞壁中纤维素的无定形区、半纤维素和木质素上的羟基位点结合，细胞壁吸湿膨胀，使得重组木表面出现跳丝现象。

木材中的导管和纤维细胞在吸水过程中起着至关重要的作用。采用吊笼式浸胶法施胶，酚醛树脂仅通过自由扩散附着在重组单元的表面或疏解裂隙中，难以向细胞壁内部渗透，导致大部分细胞壁或细胞腔存在缺胶现象。这些缺胶的细胞在成型过程中被压缩密实，但是在湿热作用下会恢复原来的形貌，从而导致重组木表面产生“跳丝”现象。而高含水率重组单元在辊压树脂浸渍过程中木材中的导管、纤维细胞等受到辊压压力的作用造成进一步破坏，同时酚醛树脂在压力的作用下进入导管和纤维细胞的细胞腔中。在热压成型过程中，木材中的纤维细胞和导管被压缩密实，酚醛树脂与细胞壁多糖聚合物发生交联反应，更多的裂隙被树脂填充，从而使得制备的重组木的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率降低，提高了其尺寸稳定性。

2.5 高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备的重组木的力学性能

RWS 的 MOR 和 MOE 分别达到 157.62 MPa 和 13.18 GPa。与 CWS 相比，MOR 变化不大，MOE 增大了 10.57%。通过方差分析(表 3)可知，两种施胶方法制备的重组木的 MOE 在 0.05 水平上差异显著，但是 MOR 差异不显著。

在宏观尺度上，CWS 样品呈现出锯齿状断裂，

表 3　重组木的静曲强度和弹性模量的方差分析

Tab. 3　Variance analysis for MOR and MOE of wood scrimber

性能	类别	平方和	df	均方	*F*	*p*
MOR	组间方差	72.63	1	72.63	0.51	0.49
	误差	1 430.91	10			
	总计	1 503.54	11	143.09		
MOE	组间方差	20 194 282	1	20 194 289.62	9.62	0.01
	误差	20 984 346	10			
	总计	40 078 629	11	2 098 434.64		

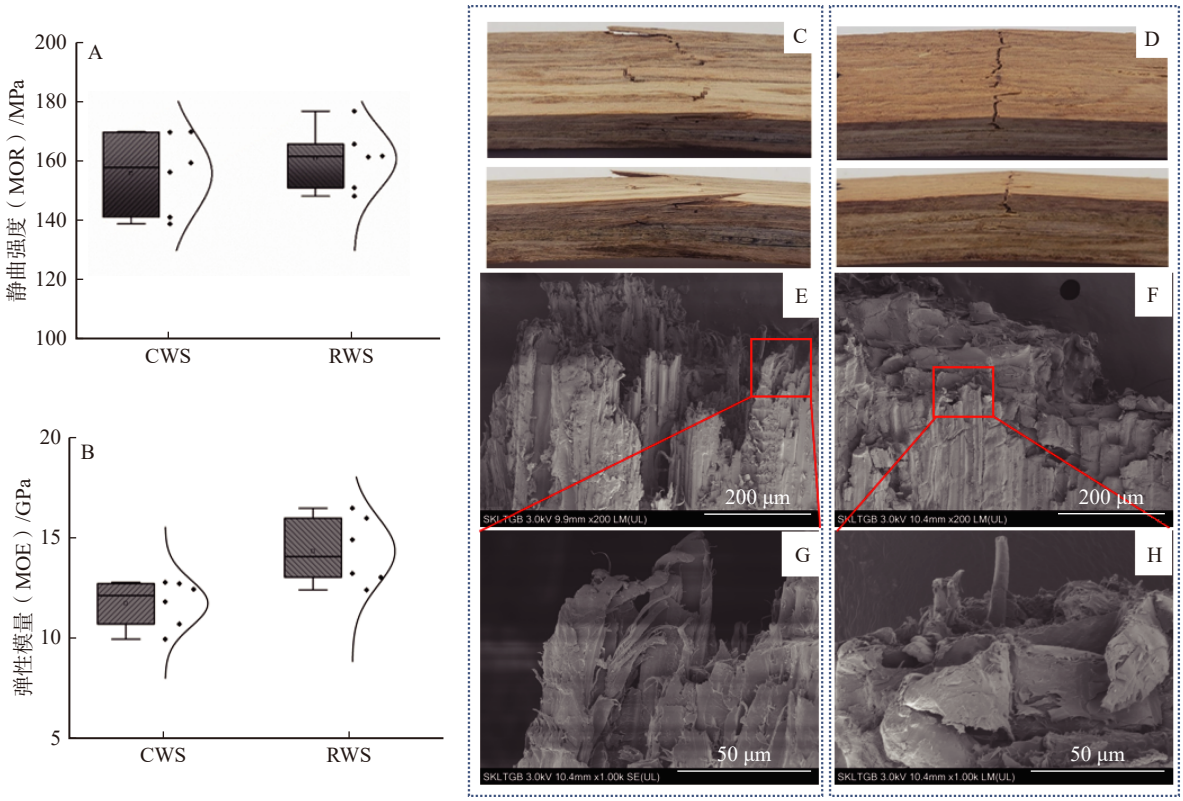
裂纹的方向和形状不规则(图 7C)，表现为韧性断裂；RWS 样品则呈现齐头断裂的模式，裂纹垂直纤维方向线性扩展(图 7D)，表现为脆性断裂。通过 SEM 观察重组木的断裂形貌可知，CWS 样品的细胞沿着微纤丝角方向被拉断，而 RWS 样品的细胞出现平口断裂(图 7F、H)。

重组木的断裂模式变化与酚醛树脂的分布密切相关。在吊笼式浸胶法中，酚醛树脂主要聚集在部分细胞腔和疏解的裂隙中；而高含水率重组单元辊压树脂浸渍中，树脂在导管和纤维细胞中的分布更加均匀，而且树脂在辊压压力的作用下渗透到木材的细胞壁中，由于固化后的酚醛树脂容易脆化，从而使得制备的重组木易发生脆性断裂。

3　结　　论

本研究以 30% 含水率的杨木重组单元为对象，创新性地采用辊压树脂浸渍技术直接对高含水率的重组单元进行施胶，省去了传统的施胶前干燥工序。通过这一改进工艺，本研究系统地探究了重组单元施胶量控制工艺和胶液分布情况，进一步解析了树脂–木材界面之间的化学作用机制，并揭示了辊压树脂浸渍技术对高含水率重组单元制备的重组木的耐水和力学性能的影响。具体结论如下。

(1)采用辊压树脂浸渍技术施胶，高含水率重组单元的施胶量随着压缩率和辊压次数的增大而增大。因此，可以通过控制单元的压缩率和辊压次数



A. MOR; B. MOE; C, E, G. CWS 形貌图; D, F, H. RWS 形貌图; C, D. 宏观形貌图; E, F, G, H. SEM 图

图 7　重组木 MOR 和 MOE 结果及其破坏形貌

Fig. 7　Results of MOR and MOE of wood scrimber and their failure morphology

来控制其施胶量；

（2）辊压树脂浸渍技术使得高含水率重组单元中的胶液分布更均匀，酚醛树脂除部分填充在细胞腔中外，还渗透到木材的细胞壁中，并与细胞壁的主要成分发生交联反应。高含水率重组单元中的导管、纤维细胞等受到辊压压力的作用造成进一步破坏，同时酚醛树脂在压力的作用下进入导管和纤维细胞的细胞腔中。在热压成型过程中，木材中的纤维细胞和导管被压缩密实，酚醛树脂与细胞壁多糖聚合物发生交联反应，更多的裂隙被树脂填充，

（3）高含水率重组单元辊压树脂浸渍法制备的重组木的尺寸稳定性和力学性能增强。相对于吊笼式浸胶法制备的重组木，高含水率重组单元通过辊压树脂浸胶法制备的重组木的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率降低幅度分别达到 41.12% 和 21.04%，弹性模量增大了 10.57%。重组木尺寸稳定性和力学性能的增强，主要与辊压树脂浸渍过程中重组单元和重组木内胶液的分布的均匀性有关。

（4）高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术制备的重组木，在力学测试过程中发生脆性断裂。因此，在实际应用当中需要综合考量辊压树脂浸渍工艺和力学性能的平衡，兼顾强度和韧性的工艺方案。

高含水率重组单元辊压树脂浸渍技术显著提升了重组木的耐水性和弹性模量，并有效降低了重组单元的胶前干燥能耗。此技术的突破可为实现重组单元的疏解–浸渍–干燥连续化生产提供重要的技术参考。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 吴婕妤, 张亚梅, 于文吉. 辊压树脂浸胶法对桉木重组木尺寸稳定性影响机理 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 141−151.
Wu J Y, Zhang Y M, Yu W J. Influence mechanism of roller-press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 141−151.

[3] Wu J Y, Zhang Y M, Yu W J. An in-depth study of the strengthening mechanism in wood scrimber prepared via roller-pressing impregnation technology[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139413.

[4] Yang C, Zhang Y M, Zhang Y H, et al. Enhanced mechanism of physical and mechanical properties of bamboo scrimber prepared by roller-pressing impregnation method[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 223: 119962.

[5] Gao Q, Lin Q, Huang Y, et al. High-performance wood scrimber prepared by a roller-pressing impregnation method[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130404.

[6] 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.

[7] 刘治刚, 高艳, 金华, 等. XRD 分峰法测定天然纤维素结晶度的研究 [J]. 中国测试, 2015, 41(2): 38−41.
Liu Z G, Gao Y, Jin H, et al. Study on natural cellulose crystallinity determinated by the technology of XRD peak separation[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(2): 38−41.

[8] Guo J, Zhou H, Jasna S, et al. Effects of ageing on the cell wall and its hygroscopicity of wood in ancient timber construction[J]. Wood Science & Technology, 2018, 52(1): 131−147.

[9] 李珠, 蒋佳荔, 吕建雄. 不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 138−145.
Li Z, Jiang J L, Lü J X. Tensile creep characteristics of compression wood and normal wood under different temperatures and loads[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 138−145.

[10] 马尔妮, 王瑜瑶, 李京予, 等. 水分对木材细胞壁孔隙结构影响研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 1−8.
Ma E N, Wang Y Y, Li J Y, et al. Research progress on the effect of water on pore structure of wood cell wall[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 1−8.

[11] 楚杰, 张军华, 马莉, 等. XRD 与 NMR 的热处理竹材结晶性能研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 256−261.
Chu J, Zhang J H, Ma L, et al. Study of crystallinity performance of pretreated bamboo fibers based on X-Ray diffraction and NMR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(1): 256−261.

[12] Báder M, Németh R. Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77: 1009−1019.

[13] Salmén L, Stevanic J S, Holmqvist C, et al. Moisture induced straining of the cellulosic microfibril[J]. Cellulose, 2021, 28: 3347−3357.

[14] Nadezda S, Julia C, Adriana E, et al. Properties characterization of chemically modified hemp hurds[J]. Materials, 2014, 7(12): 8131−8150.

[15] Zeng Q, Yu X, Wei N, et al. Effect of impregnation with natural shellac polymer on the mechanical properties of fast-growing Chinese fir[J]. Polymers, 2022, 14(18): 3871.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）