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

辊压树脂浸胶法对桉木重组木尺寸稳定性影响机理

吴婕妤 张亚梅 于文吉

Influence mechanism of roller-press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber

Wu Jieyu, Zhang Yamei, Yu Wenji

引用本文:
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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230206
Wu Jieyu, Zhang Yamei, Yu Wenji. Influence mechanism of roller–press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1):141–151. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230206

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230206

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巴里黄檀心材色素为染料桉木单板仿珍染色工艺与着色机制

Dyeing process and mechanism of eucalyptus veneer with *Dalbergia bariensis* heartwood pigment as dye

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 151–159. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190270

碱木质素与超支化聚丙烯酸酯乳液复配改性速生青杨的尺寸稳定性研究

Dimensional stability of fast–growing *Populus cathayana* modified with the compound of alkali lignin and hyperbranched polyacrylate emulsion

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 118–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210268

苯丙乳液掺杂对地质聚合物木材胶黏剂性能的影响

Effects of styrene–acrylic emulsion doping on the properties of geopolymer wood adhesives

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 131–139. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200019

国产日本落叶松正交胶合木的销槽承压强度

Embedment strength of domestic Japanese larch cross–laminated timber

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 116–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210326

热处理对表面密实材变形固定及性能影响

Effects of thermal treatment on deformation fixation and properties of surface densified wood

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 121–128. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180175

可可球二孢的培养及其侵染橡胶木表面性能的研究

Growth of *Lasiodiplodia theobromae* and its dyeing effect on the surface properties of rubber wood

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 160–167. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190382

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230206

辊压树脂浸胶法对桉木重组木尺寸稳定性影响机理

吴婕妤　张亚梅　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】为解决重组木制备过程中重组单元施胶不均匀导致的尺寸稳定性差的问题，通过辊压树脂浸胶工艺制备重组木，探究辊压树脂浸胶工艺对桉木重组木尺寸稳定性的影响机理。**【方法】**分别通过吊笼式浸胶法和辊压树脂浸胶法制备桉木重组木，采用超景深显微镜、扫描电子显微镜、微计算机断层扫描仪和激光共聚焦显微镜观察重组单元和重组木表面形貌、微观结构和胶液分布情况，并采用 X 射线光电子能谱仪、粗糙度仪、接触角测定仪以及 63 ℃ 水泡 24 h 和 28 h 循环法（沸水煮 4 h，63 ℃ 烘 20 h，沸水煮 4 h）研究重组木表面化学成分、表面粗糙度、表面润湿性和耐水性能。**【结果】**与吊笼式浸胶法制备的重组木（CWS）相比，辊压树脂浸胶法制备的重组木（RWS）表面裂隙减少，粗糙度降低，表面润湿性减弱，耐水性能显著增强。RWS 表面粗糙度 R_a 和 R_z 相比 CWS 分别下降了 34.38% 和 72.75%。接触角测试结果表明，第 20 s 时 RWS 的表面接触角相对于 CWS 增大幅度为 283.95%。63 ℃ 水泡 24 h 测试结果显示：RWS 的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率分别为 5.47% 和 1.11%，与 CWS 相比降低幅度分别达到 52.16% 和 50.09%。28 h 循环测试结果显示：RWS 的吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率分别为 6.24% 和 1.17%，与 CWS 相比降低幅度分别为 51.45% 和 58.51%。辊压浸胶过程对重组单元产生了二次破坏，增加了胶液进入的通道；同时，辊压使细胞在被压缩到恢复原貌的过程中产生的负压，增加了胶液的渗透深度，形成网状胶合结构，加强了重组木的胶合性能，抑制了木材细胞在吸水后的回弹。**【结论】**辊压树脂浸胶法提高了重组木内部胶液分布的均匀性，降低了桉木重组木表面的粗糙度和润湿性，显著提高了重组木的耐水性能，改善了重组木的尺寸稳定性，对重组木的工艺优化和连续化生产具有重要的参考和指导意义。

关键词：吊笼式浸胶；辊压树脂浸胶；桉木重组木；表面性能；耐水性能；尺寸稳定性
中图分类号：TS653；S792.39　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)01−0141−11
引文格式：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 Jieyu, Zhang Yamei, Yu Wenji. Influence mechanism of roller-press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 141−151.

Influence mechanism of roller-press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber

Wu Jieyu　Zhang Yamei　Yu Wenji
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: ［**Objective**］ To solve the problem of poor dimensional stability caused by the uneven disintegration during the preparation process of scrimber, the scrimber was prepared by roller-press impregnation, and the influence mechanism of roller-press impregnation on the dimensional stability of eucalyptus scrimber was explored. ［**Method**］ In this study, eucalyptus scrimber was prepared by cage and roller-press impregnation techniques, and the surface morphology, microstructure, and glue distribution were observed by ultra-depth microscope, scanning electron microscope, microcomputer tomography scanner, and laser confocal microscope. The surface chemical composition, surface roughness, surface wettability, and water resistance of scrimber were studied by X-ray photoelectron spectroscopy, roughness tester, contact

收稿日期：2023−08−21　**修回日期：**2023−12−04
基金项目：高性能重组木连续化制造关键技术与装备（2021YFD2200601）。
第一作者：吴婕妤，博士生。主要研究方向：木材重组材料制备与表征。Email：wujieyu@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：张亚梅，博士，副研究员。主要研究方向：重组材料制造与应用技术。Email：zhangyamei@caf.ac.cn　地址：同上。
本刊网址：http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

angle tester, soaking at 63 ℃ for 24 h, and 28 h cycle treatment (boiling for 4 h, dry at 63 ℃ for 20 h, boiling for 4 h). [**Result**] Compared with the wood scrimber prepared by cage impregnation (CWS), the surface cracks, roughness, and the surface wettability of wood scrimber prepared by roller-press impregnation (RWS) were reduced, and the water resistance of RWS was significantly increased. The results of roughness showed that compared with CWS, the surface roughness R_a and R_z of RWS decreased by 34.38% and 72.75%, respectively. The contact angle test results indicated that the surface wettability of RWS was weakened, and the surface contact angle of RWS increased by 283.95% compared with CWS at the 20th second. The test result of soaking at 63 ℃ for 24 h showed that the thickness swelling ratio (TSR) and width swelling ratio (WSR) of RWS were 5.47% and 1.11%, respectively, which were 52.16% and 50.09% lower than those of CWS. The TSR and WSR of RWS under 28 h cycle treatment were 6.24% and 1.17%, respectively, which were reduced by 51.45% and 58.51%, respectively. The process of roller press caused secondary damage to the recombination unit, which increased the flow path for PF resin solution. At the same time, the negative pressure generated by the roller pressing during the process from compressing the cells to restoring their original appearance increased the penetration depth of the glue, formed a network bonding structure, strengthened the bonding performance of the recombined wood, and inhibited the rebound of wood cells after water absorption. [**Conclusion**] The roller-press impregnation improves the uniformity of glue distribution in scrimber, reduces the surface roughness of eucalyptus scrimber and wettability, and significantly improves the water resistance and dimensional stability, which has important references and guidance for the process optimization and continuous production of scrimber.

Key words: cage impregnation; roller-press impregnation; eucalyptus scrimber; surface performance; water resistance; dimensional stability

桉树(*Eucalyptus robusta*),是我国三大速生林树种之一,具有干形通直、材质细腻、储量丰富等特点,但也存在材质疏松、易开裂、性能差等缺陷[1]。重组木是由重组单元按顺纹组坯、经胶合压制而成的板材或方材,是一种新型复合材料,其克服了木材径级小、强度低等劣势,赋予木材原料高利用率、产品高性能和高附加值等特点[2−3]。目前,在传承传统重组木的基础上,中国林科院木材所率先提出了以人工林速生低质木材为原料,先将原木旋切成厚单板(4 ~ 12 mm),再采用疏解设备将厚单板疏解制备成网状结构的纤维化木单板,并以此为重组单元制备重组木。速生桉木便可通过上述技术制备成性能优良的重组木[4−6]。然而,在前人研究中发现,桉木重组木的尺寸稳定性较差,难以应用于室内潮湿或室外环境[7]。因此,为了扩展桉木重组木的应用范围,迫切需要改良制备工艺以进一步提升其尺寸稳定性。

重组木制备过程中,重组单元的施胶工序是关键环节,对重组木的性能尤其是耐水性能有非常重要的影响[5]。目前,在工业化生产过程中企业主要采用吊笼式浸胶法施胶,通过控制胶液的固含量和浸胶时间来控制施胶量。然而,在吊笼式浸胶法施胶过程中,胶液主要分布于疏解单板的表层和疏解裂隙中[8]。由于单板在疏解过程中形成的裂隙存在分布不均现象,施胶后胶液分散在裂隙中,容易引起重组木内部胶合不均从而导致尺寸稳定性差[9]。针对吊笼式浸胶过程中存在的问题,中国林科院木材所开发了辊压树脂浸胶技术。该技术是将疏解单板置于辊压树脂渗透设备中,通过辊压压力将胶黏剂导入到木材中;同时,通过设置压辊间隙和胶黏剂的固含量来控制重组单元的施胶量[10]。该技术可解决吊笼式浸胶法中胶液分布不均以及重组单元中施胶量难以精准控制的问题,实现重组单元均匀精准施胶[8−10]。

本研究以桉木单板为原料、酚醛树脂为胶黏剂,采用吊笼式浸胶法和辊压树脂浸胶法两种施胶工艺制备桉木重组木,研究辊压树脂浸胶工艺对桉木重组木耐水性能的影响;通过超景深显微镜、扫描电子显微镜、微计算机断层扫描技术、激光共聚焦显微镜、粗糙度仪、X 射线光电子能谱和接触角测量仪观察不同浸胶工艺制备的桉木重组木表面形貌变化、微观结构演变、胶液分布情况和表面性能变化,揭示辊压树脂浸胶工艺对重组木尺寸稳定性能的影响机理,以期为重组材的工艺优化和连续化制备提供技术参考与理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

桉木采自广西,树龄 10 年,胸径 100 ~ 200 mm。桉木疏解单板,厚度为 4.0 mm,5 min 吸水率为

86.52%。桉木旋切单板，厚度为 0.70 mm，气干含水率为 9.12%。酚醛树脂（phenol-formaldehyde resin，PF）胶黏剂，购自北京太尔胶黏剂有限公司。胶液固含量为 48.12%，黏度为 67.5 Pa·s（25 ℃），水溶倍数为 20 倍，pH 值为 9.71。

1.2　试验方法

将桉木旋切成 4 mm 厚的单板后放入疏解机中制备成疏解单板，并干燥至含水率为 8% ~ 10%。通过吊笼式浸胶法和辊压树脂浸胶法分别对疏解单板施胶（图 1），控制单板的施胶量为 17% ~ 18%，施胶量计算方法如式（1）所示。施胶后将桉木单板干燥至含水率为 10% ~ 12%，采用热压法制备重组木，热压温度为 150 ℃，热压时间为 1.10 min/mm，热压压力为 3 ~ 4 MPa。重组木尺寸为 450 mm（长）× 160 mm（宽）× 20 mm（厚），密度为 1.0 g/cm^3。将制备好的重组木在自然环境中平衡两周后进行裁边、砂光。

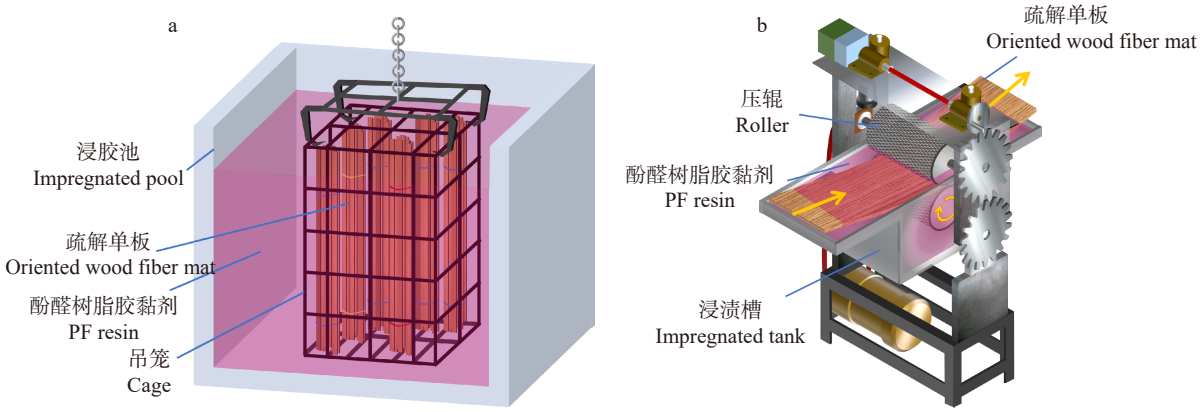


图 1　吊笼式浸胶（a）和辊压树脂浸胶工艺（b）示意图

Fig. 1　Schematic diagram of cage (a) and roller-press impregnation (b)

吊笼式浸胶法制备重组木（wood scrimber prepared by cage impregnation，CWS）具体流程：将装有桉木疏解单板的吊笼放入胶液固含量为 20% 的浸胶池中，浸渍 15 min 后取出并沥干 5 min 至胶液不再滴落。辊压树脂浸胶法制备重组木（wood scrimber prepared by roller-pressed impregnation，RWS）具体流程：将酚醛树脂胶配置成固含为 17% 的胶液并倒入辊压机的胶槽中，下压辊全部浸没在胶液中，上压辊的 1/3 浸没在胶液中，设置辊压机的间隙为 2 mm，将桉木疏解单板以 7.32 m/min 的线速度通过压辊施胶，辊压浸胶次数为 3 次，辊压浸胶过程中单板的压缩率为 50%，取出后沥干 5 min 至胶液不再滴落。施胶量（G，%）、辊压疏解单板压缩率（C，%）计算方式分别见式（1）和式（2）。

$$G = \frac{(m_2 - m_1)S}{m_1(1 - M)} \times 100\% \tag{1}$$

式中：m_1 为单板施胶前质量，g；m_2 为单板施胶后质量，g；S 为胶液固含量，%；M 为单板施胶前含水率，%。

$$C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中：T_1 为辊压前桉木单板厚度，mm；T_2 为辊压后桉木单板厚度，mm。

将厚度为 0.7 mm 的桉木单板采用两种浸胶方法施胶后，在 130 ℃ 烘箱中干燥 20 min 使胶液固化，用于观察胶液在单板中的分布情况。

1.3　性能表征

1.3.1　胶液分布表征

用滑走切片机（RM2245，德国 Leica）分别将两种浸胶方式制备的 0.7 mm 桉木单板及其重组木切成 20 μm 厚的薄片，用 0.5% 甲苯胺蓝溶液染色 5 min 后，置于质量浓度 20%、40%、60%、75%、85%、95% 和 100% 乙醇中脱除水分，待切片中乙醇完全蒸发后滴上甘油，用盖玻片覆盖。采用激光共聚焦显微镜（LSM980，德国 ZEISS）观察辊压前后桉木单板和重组木中胶液分布情况。

制备溴标记的 PF 胶作为胶黏剂（Br-PF），通过两种浸胶方式制备重组单元，并压制重组木。分别取两种浸胶方式制备的疏解单板中的纤维束，使用塑料套包裹以防止纤维束掉落，并裁成 5 mm 长用于测试。在 CWS 和 RWS 中选取相同部位，取尺寸为 5 mm × 5 mm × 5 mm 的小样用于测试。采用微计算机断层扫描（micro-CT，Skyscan1172，比利时 Bruker），利用 Nrecon、Data Viewer、CTan、CTvol 和 CTvox 软件进行图像分析，观察 Br-PF 在疏解单板和重组木中的渗透和分布情况。在 Micro-CT 图中，RGB 色标表示在扫描范围内，颜色对应的数值越大，密度越大，其中密度越大表示 PF 胶液含量越高。

1.3.2　微观结构表征

采用滑走切片机将桉木原木、辊压前后桉木疏

解单板、CWS、RWS 以及 63 ℃ 水泡 24 h 后的 CWS 和 RWS 的横切面切平，均匀喷金，采用扫描电子显微镜（SEM，Hitachi-4800，日本日立）观察其微观构造。

1.3.3 表面性能表征

（1）表面形貌观察。采用超景深显微镜（VHX-6000，日本 Keyence）观察辊压前后桉木单板和桉木疏解单板表面形貌，并对 CWS 和 RWS 表面进行观察。在超景深图中，色标表示在材料扫描范围内，颜色对应的数值越小，与材料表面距离越远。

（2）表面粗糙度测定。将桉木原木弦切面和重组木表面用 400 目的砂纸砂光后擦净，采用表面粗糙度仪（Time3230，北京时代之峰有限公司），通过探针法测得重组木表面轮廓算数平均偏差（R_a）、微观不平度十点高度（R_z）和粗糙度曲线，每个试件选取 5 个不同位置的测试点，结果取平均值。

（3）表面化学成分分析。采用 X 射线光电子能谱仪（XPS，Escalab 250Xi，美国 Thermo Scientific）测定 CWS 和 RWS 的表面化学组成和相对含量，取样位置为重组木中心部位 5 mm × 5 mm 处，仪器使用单色化 Al 靶（E = 1 487.20 eV），数据处理采用 XPSPEAK 和 Origin 2019b 软件。

（4）表面润湿性表征。采用接触角测量仪（OCA20，德国 Dataphysics），测定水在重组木表面的动态接触角。将重组木上下表面统一用 400 目的砂纸砂光后擦净，随机选择一面在室温环境下测试，定量进给 5 μL 的蒸馏水液滴，测试 20 s 内的动态接触角。每个样品测试 3 个不同位置，结果取平均值。

（5）重组木耐水性能表征。参照 GB/T 30364—2013《重组竹地板》，测定重组木在 63 ℃ 水泡 24 h 和 28 h 循环（即沸水煮 4 h，63 ℃ 烘 20 h，沸水煮 4 h）条件下的吸水厚度膨胀率、吸水宽度膨胀率。试件尺寸为 20 mm（长）× 20 mm（宽）× 10 mm（厚），每个条件测试 6 个试件，结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 辊压树脂浸胶法对重组单元形貌的影响

桉木旋切单板、疏解单板和辊压树脂浸胶疏解单板的表面形貌和微观结构如图 2 所示。桉木旋切单板的表面可以看到多条裂纹（图 2a 箭头），单板疏解后，其表面会产生点线状裂隙，主要发生在胞间层处并延伸至导管，但由于疏解过程中单板的破坏不均匀，桉木疏解单板中仍然留有部分导管未被破坏（图 2e）。辊压树脂浸胶的疏解单板，在辊压压力的作用下其相邻纤维束之间发生挤压、变形，部分纤维束发生断裂和破坏（图 2h、i），导管被进一步压溃（图 2g），胞间层破坏增加，裂隙增多。辊压后的疏解单板木纤维束直径显著减小（图 3），其直径主要分布区域从 4.0 ~ 4.5 mm 减小为 2.0 ~ 2.5 mm。由此可知，辊压树脂浸胶过程对疏解单板具有二次破坏作用，导管、胞间层的破坏以及裂隙的增多，为胶液的渗透提供了更多的通道。

2.2 辊压树脂浸胶法对重组单元胶液分布和渗透的影响

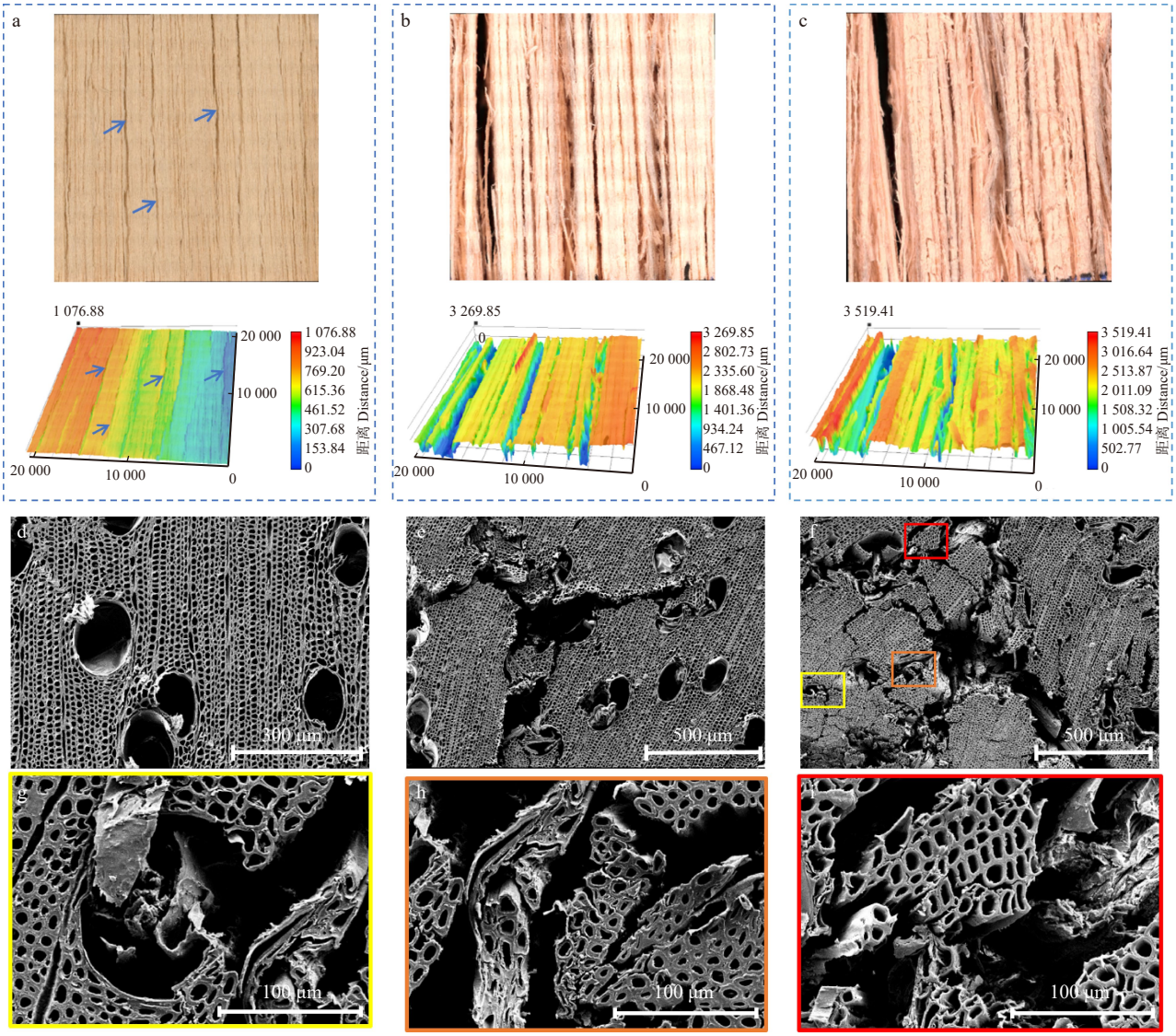
疏解单板中 Br-PF 的分布情况如图 4a，b 所示，图中深紫色的部分代表木材，外围圆圈状为包裹疏解单板的塑料套，浅蓝色至白色的部分代表 Br-PF 胶液。吊笼式浸胶单板（图 4a），胶液主要分布在单板疏解时产生的裂隙周围，部分胶液会随着疏解裂隙进入纤维束内部。然而，由于单板在疏解过程中形成的纤维束直径大小不均，在浸胶过程中会使胶液集中分布于直径较小的纤维束周围。而辊压树脂浸胶过程中，在辊压压力的作用下疏解单板中裂隙增多，木纤维束直径减小，数量增多，胶液在单板中分布更为均匀（图 4b）。

为消除疏解工艺对单板破坏的影响，观察胶液在薄单板（0.7 mm 厚）中的分布情况（图 4c、d）。采用吊笼式浸胶法施胶的单板，胶液主要分布于单板横截面中边缘部分的细胞腔和单板旋切时产生的裂隙中；而采用辊压树脂浸胶法施胶的单板中，胶液除了分布于单板横截面边缘的细胞腔和旋切裂隙外，还进入了单板在辊压浸胶过程中产生的裂隙以及单板内部的导管中，在导管内壁形成胶层。在辊压树脂浸胶过程中，单板中的细胞会被压缩，在辊压压力消失的瞬间，被压缩的细胞要恢复原貌，此时产生的负压会增加胶液在木材细胞和细胞间隙中的渗透。桉木的导管细胞与纤维细胞相比，细胞腔更大，细胞壁更薄，在辊压压力的作用下被压缩的程度会相对较大，当辊压压力消失，细胞恢复原貌时所产生的负压使导管更容易吸收胶液。

通过扫描电镜（图 4e ~ h）观察可知：吊笼式浸胶的疏解单板中，胶液主要附着在疏解单板表面、木材细胞的外壁或分布于被破坏的细胞的内壁，在胶液表面形成的裂纹为干燥过程中的温差导致。而辊压树脂浸胶的疏解单板表面附着的胶液较少，其木材细胞的内壁也未有胶液堆积，而是在辊压压力作用下胶液向细胞壁内渗透，并在细胞壁和纹孔内形成胶钉（图 4h 红色箭头）。

2.3 辊压树脂浸胶法对重组木中胶液分布的影响

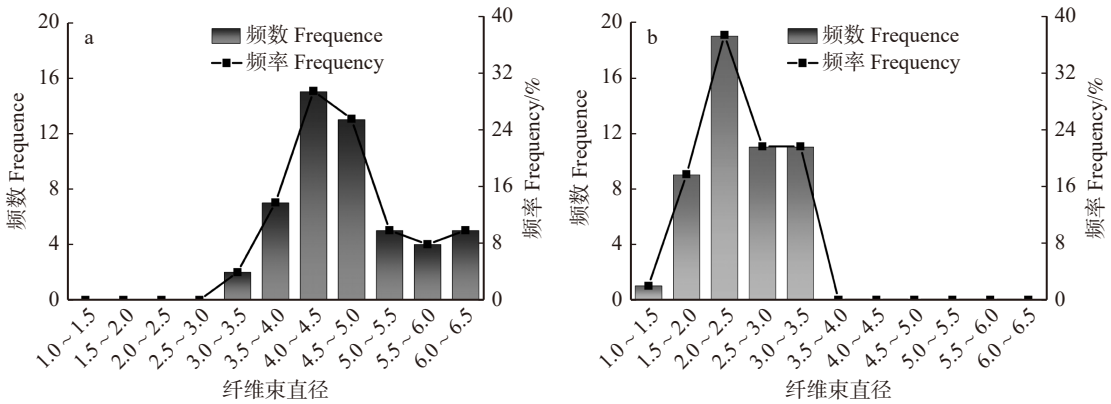
在 CWS（图 5a）中，胶液主要分布于重组单元胶合界面处，少部分胶液在疏解单板中沿纵向裂隙渗透至重组单元内部，但由于木纤维束直径分布不均，胶液在疏解单板中的分布液也不均匀。而在 RWS



a, d. 桉木旋切单板 Eucalyptus veneer; b, e. 桉木疏解单板 Eucalyptus crushed veneer; c, f. 辊压树脂浸胶后桉木疏解单板 Eucalyptus crushed veneer after roller press; g. 辊压破坏的导管 Vessel destruction by roller pressing; h. 辊压后纤维束破坏 Fiber bundle destruction after roller pressing; i. 辊压后胞间层破坏 Middle lamella destruction after roller pressing

图 2　桉木旋切单板、疏解单板和辊压树脂浸胶后疏解单板表面的超景深图(a、b、c)及横切面的 SEM 图(d、e、f、g、h、i)

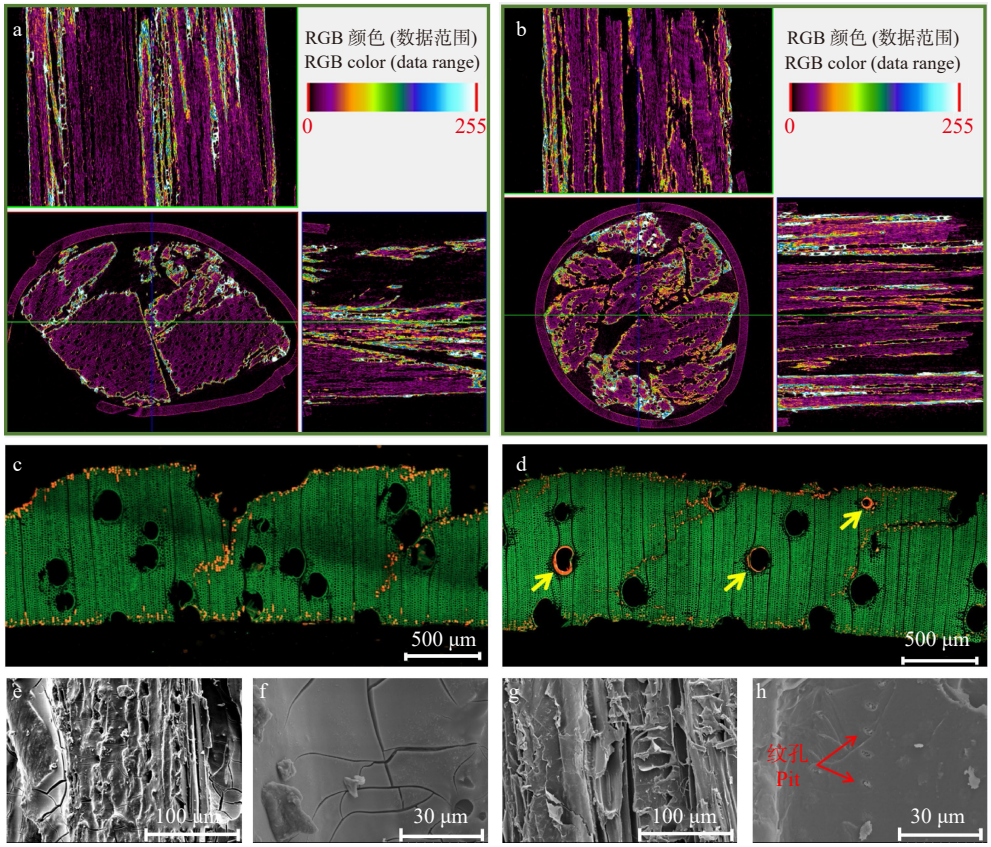
Fig. 2　UDM (a, b, c) and SEM images (d, e, f, g, h, i) of eucalyptus veneer, crushed veneer before and after roller press



a 疏解单板 Crushed veneer　　b 辊压树脂浸胶疏解单板 Crushed veneer after roller press

图 3　纤维束直径分布

Fig. 3　Fiber bundle diameter distribution



a. 吊笼式浸胶疏解单板 Crushed veneer prepared by cage impregnation; b. 辊压树脂浸胶疏解单板 Crushed veneer prepared by roller-press impregnation; c. 吊笼式浸胶桉木单板 Eucalyptus veneer prepared by cage impregnation; d. 辊压树脂浸胶桉木单板 Eucalyptus veneer prepared by roller-press impregnation; e. 吊笼式浸胶法疏解单板表面 Surface of crushed veneer prepared by roller-press impregnation; f. 吊笼式浸胶疏解单板表面导管壁 Vessel wall on surface of crushed veneer; g. 辊压树脂浸胶疏解单板表面 Surface of crushed veneer prepared by roller-press impregnation; h. 辊压树脂浸胶疏解单板表面导管壁 Vessel wall on surface of crushed veneer prepared by roller-press impregnation

图 4 吊笼式浸胶和辊压树脂浸胶疏解单板胶液分布的 micro-CT(a、b)、LSM(c、d)和 SEM 图(e、f、g、h)

Fig. 4 Micro-CT (a, b), LSM (c, d) and SEM images (e, f, g, h) of eucalyptus crushed veneer prepared by cage and roller-press impregnation

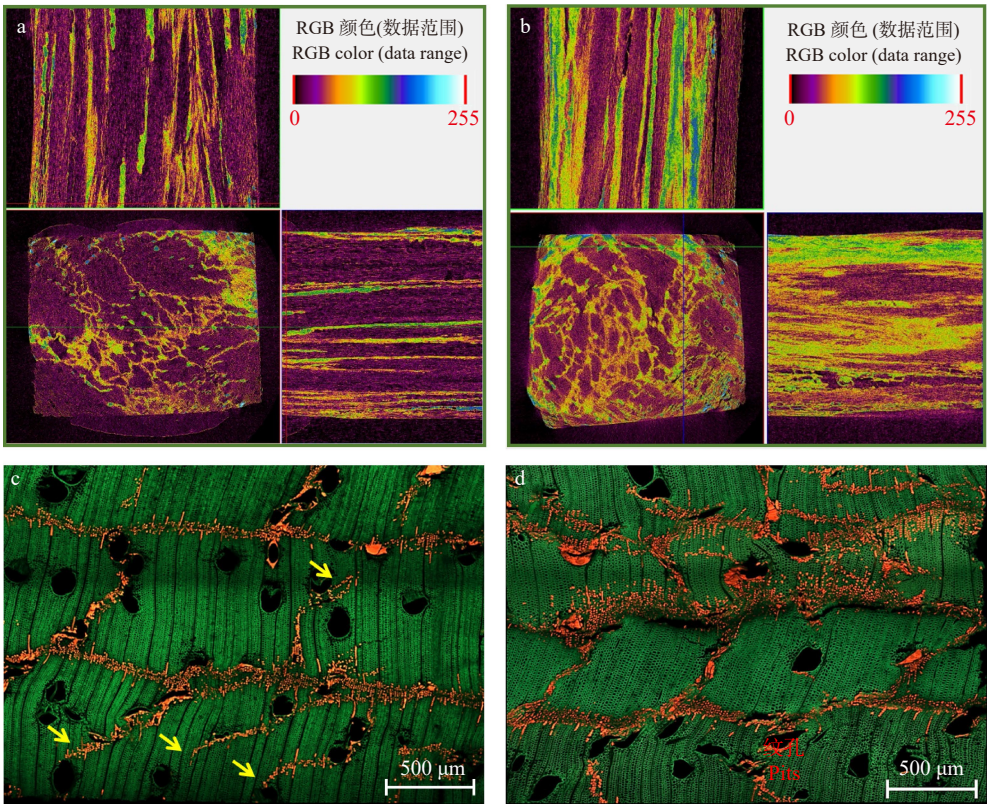
(图 5b)中，由于重组单元中裂隙增多，木纤维束直径变小，胶液随裂隙在重组木内部的分布更加均匀，在重组单元间形成纵横分布。

为了消除疏解工艺对单板破坏的影响，采用 4 mm 旋切单板为原料制备 CWS 和 RWS(图 5c，d)。在 CWS 内部，胶液主要分布于胶合层附近，部分胶液进入单板旋切时产生的裂纹中(图 5c 中黄色箭头)；在 RWS 中，胶液在胶合层附近大量分布，此外在辊压压力作用下，单板中的部分导管被压缩，旋切裂纹进一步延伸，在横截面中纵向贯通；胶液在细胞负压状态下沿裂纹分布渗透，填充于细胞腔和细胞裂隙中，在重组单元横截面区域中形成类似平行四边形状的胶合区，在重组木横截面中形成网状胶合结构，使纤维束的四周紧密结合，从而增强了重组木内部的胶合结构。

2.4 辊压树脂浸胶法对重组木表面性能的影响

2.4.1 表面形貌和表面粗糙度

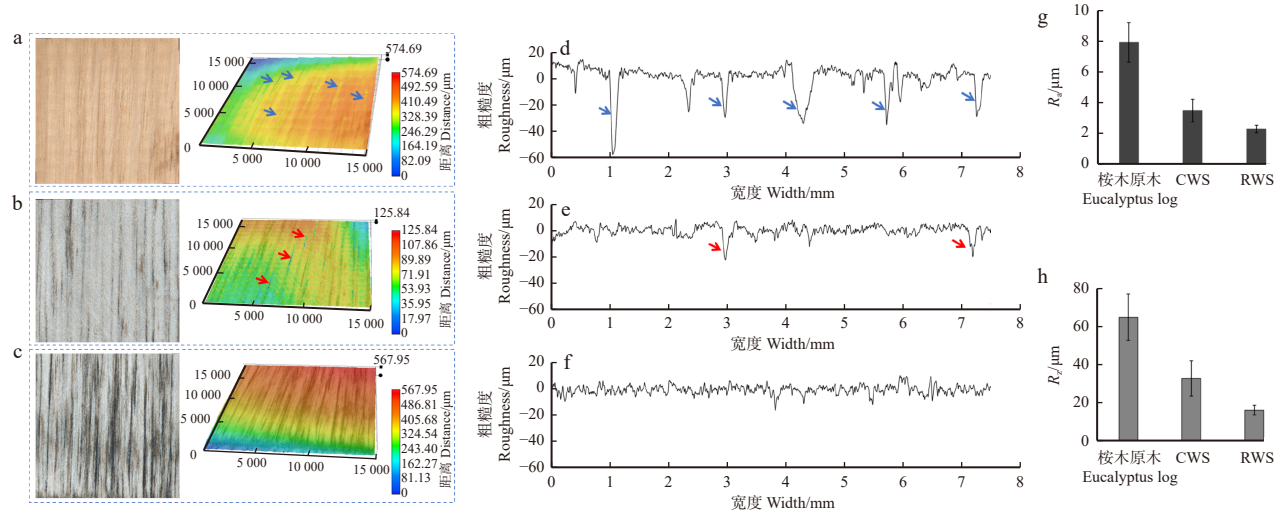
超景深显微镜观察结果(图 6a，b，c)显示：桉木原木表面粗糙，表面形貌高度彩图显示有较多裂隙，且其粗糙度曲线中存在多个大波谷(图 6a，d 蓝色箭头)。CWS 表面颜色较浅，深色纹理较少，且其表面形貌高度彩图中存在多条明显裂隙，粗糙度曲线中也存在多个较大的波谷(图 6b，e 红色箭头)。与 CWS 相比，RWS 表面颜色加深，深色纹理较多，且其表面更平整；通过探针法测定的表面粗糙度值显著降低(图 6g，h)，其 R_a 和 R_z 相比 CWS 降低幅度分别达到 34.38% 和 72.75%。RWS 表面深色纹理的增多，主要由于辊压过后重组单元中裂隙增多，胶液随裂隙分布更均匀，而酚醛树脂呈现红褐色，因此在重组木表面呈现大量深色纹理。桉木和 CWS 表面的裂隙以及粗糙度曲线中的大波谷主要为桉木导管细胞腔在表面形成的凹陷。通过测试桉木导管的直径(图 7)可知：其直径主要分布在 120 ~ 200 μm，相比其他常用制备重组木树种(如杨木，导管直径 50 ~ 100 μm[11−13])较大。因此，采用吊笼式浸胶法制备桉木重组木时，未被完全疏解破坏的导管易在重组木表面形成较多裂隙，影响表面粗糙度。而辊压树脂浸胶工艺中，在辊压压力下大部分导管被压溃，消除



a, b. Micro-CT; c, d. LSM

图 5　CWS(a、c)和 RWS(b、d)的胶液分布

Fig. 5　Glue distribution of CWS (a, c) and RWS (b, d)



a, d. 桉木原木 Eucalyptus log; b, e. CWS; c, f. RWS

图 6　桉木原木、CWS 和 RWS 表面形貌(a、b、c)、粗糙度曲线(d、e、f)及粗糙度 R_a(g)、R_z(h)

Fig. 6　Surface morphology (a, b, c), roughness curves (d, e, f) and R_a (g), R_z (h) of eucalyptus log, CWS and RWS

了导管腔径大带来的影响。此外，在负压的作用下辊压浸胶后大部分导管被胶液填充，极大减少了空心导管的数量，从而降低了 RWS 的表面粗糙度。

2.4.2　表面化学性能

重组木表面 $C1_S$ 和 $O1_S$ 的分峰拟合曲线和化学组分，分别如图 8 和表 1 所示。C1 归属于木材中具有苯基丙烷结构的木质素与脂肪、脂肪酸和蜡等抽提物中的—C—C 和—C—H，此外，由于酚醛树脂的结构与木质素类似，也会影响 C1 的相对含量[14]。C2 归属于木材中的纤维素和半纤维素的—C—O，纤维素分子中含有的大量与羟基相连的碳原子为 C2 的主要来源。C3 归属于木材中木质素中羰基结构、半纤维素和半纤维素中缩醛结构中的—O—C—O—或—C—O—[15−17]。O1 主要来源于木

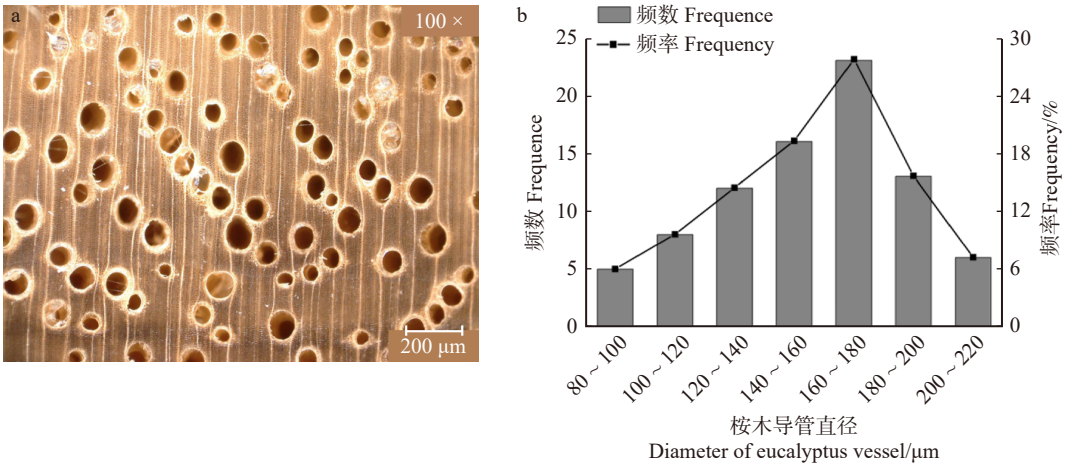


图 7 桉木导管形貌(a)和直径分布图(b)

Fig. 7 Morphology of eucalyptus vessel (a) and chart of vessel diameter distribution (b)

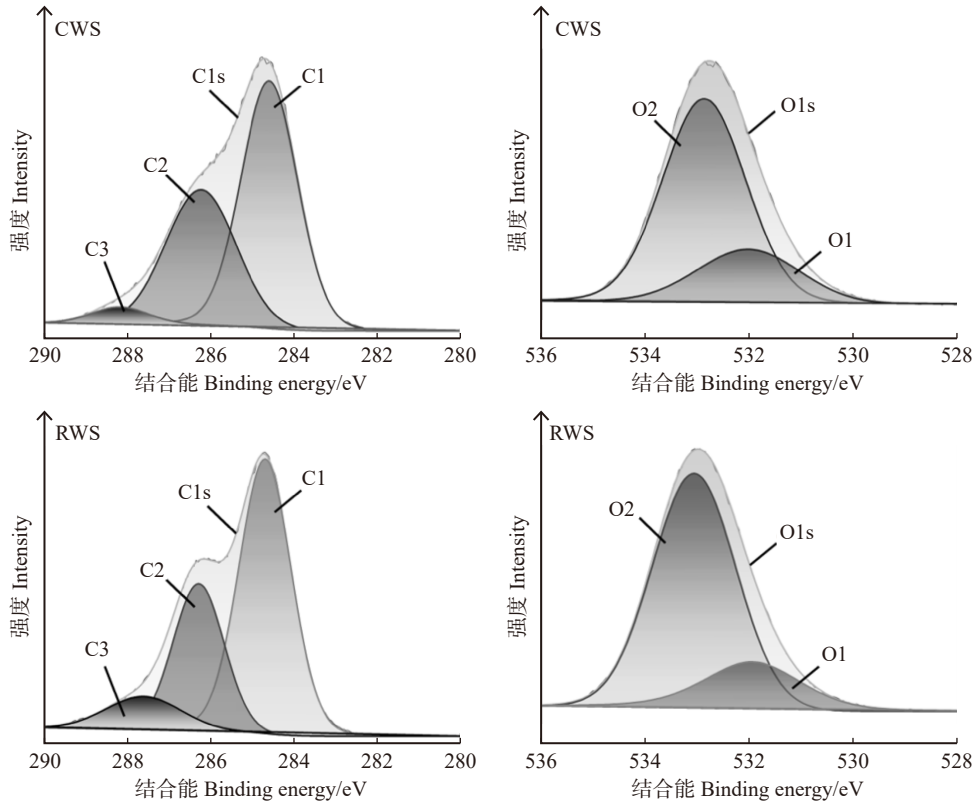


图 8 CWS 和 RWS 的 C1s 和 O1s XPS 分峰拟合图

Fig. 8 C1s 和 O1s XPS peak fitting diagram image of CWS and RWS

表 1 CWS 和 RWS 表面化学成分分析

Tab. 1 Surface chemical composition of CWS and RWS

试样 Sample	相对含量 Relative content/%				
	C1	C2	C3	O1	O2
CWS	58.33	38.12	3.55	76.12	23.88
RWS	60.42	30.14	9.44	78.99	21.01

质素，O2 主要来源于纤维素和半纤维素[18]。结果显示：与 CWS 相比，RWS 表面 C1 值略有升高，上升幅度为 3.58%；C2 值大幅度减小，减少幅度为 20.93%；C3 值显著增多，增加幅度为 165.92%；O1 值有小幅的上升，上升幅度为 3.77%；O2 值的下降幅度达到 12.02%。

与 CWS 相比，RWS 表面化学成分的变化，主要与多糖成分的降解和表面胶液的分布有关。在辊压树脂浸胶工艺中，胶液在单板中分布更为均匀，对单板的包覆面积增大，从而使得制备的 RWS 表面化学成分中 C1 含量增多。此外，辊压浸胶后纤维束和导管的破坏使裸露的细胞壁面积增多，在重组木成型过程中，在高温(150 ℃)和高压的作用下，重组木表面的受热面积增大，热稳定性较差的半纤维素在热压过程中发生热解[19]，从而使得 RWS 表面的多糖物

质减少，C2 含量减少，C3 的含量相对增多。O1、O2 的变化，也说明了 RWS 表面木质素和酚醛树脂胶液含量增加，多糖含量减少的现象。

2.4.3　表面润湿性

蒸馏水在 CWS 和 RWS 表面接触角变化如图 9 所示。液滴在 RWS 表面接触角的减小速度明显低于 CWS。在第 20 s 时，液滴在 RWS 表面的触角为 31.1°，而在 CWS 表面接触角仅为 8.1°，相比之下，RWS 表面接触角的增大幅度为 283.95%，这说明 RWS 表面润湿性降低。

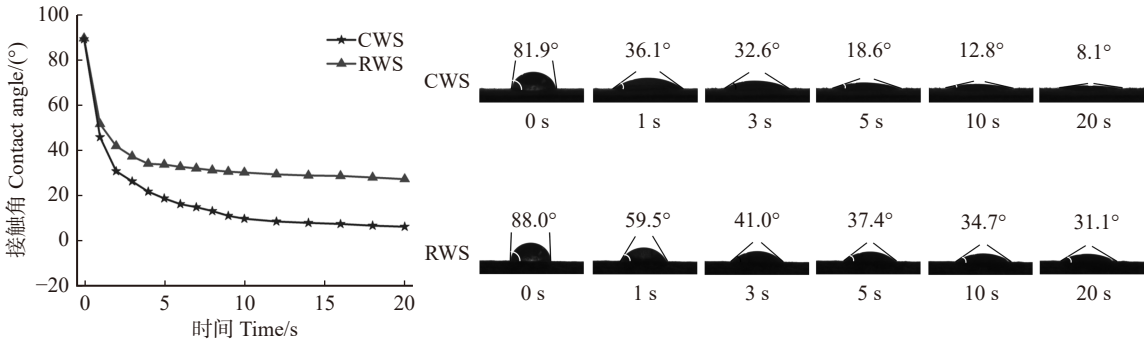


图 9　蒸馏水在 CWS 和 RWS 表面接触角随时间变化

Fig. 9　Contact angle of the water droplet on the surface of CWS and RWS with time

RWS 表面润湿性的变化主要与其表面粗糙度和表面化学成分的变化有关。辊压树脂浸胶工艺使得重组木表面的粗糙度降低，表面裂隙减少，同时胶液的均匀分布填补了重组木内部的空隙，减少了水分进入重组木内部的通道。此外，表面化学成分结果表明：重组木表面半纤维素相对含量减少，其亲水性官能团随之减少，降低了重组木表面的吸湿性。因此，与 CWS 相比，RWS 表面的润湿性降低。

2.5　辊压树脂浸胶法对重组木耐水性能的影响

通过 63 ℃ 水泡 24 h 和 28 h 循环处理测试 CWS 和 RWS 的吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率，结果如图 10a、b 所示。与 CWS 相比，RWS 的吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率降低，在 63 ℃ 水泡 24 h 的条件下降低幅度分别达到 52.16% 和 50.09%；在 28 h 循环处理下降低幅度分别达到 51.58% 和 58.51%。试验结果表明：RWS 耐水性能提高，尺寸稳定性得到改善。

重组木在 63 ℃ 水泡 24 h 后表面粗糙度、表面形貌及其横截面扫描电镜图如图 10c ~ g 所示。结果显示 CWS 经过水泡后表面呈现凹凸不平，即跳丝现象明显（图 10d）。通过超景深显微镜测得重组木水泡后的粗糙度（图 10c）结果显示：RWS 表面粗糙度相比 CWS 显著降低，R_a 和 R_z 下降幅度分别为 31.49% 和 38.11%。经过扫描电镜观察结果显示：CWS 在水泡后表面有明显的凸起（图 10f），其内部细胞在吸水后有回弹和开裂的现象；而 RWS 经过水泡后表面更平整，无明显跳丝现象（图 10e），而且图中显示 RWS 水泡后表面无明显的凸起（图 10g），只有少数导管发生轻微回弹，大部分导管仍然保持压缩状态。这说明 RWS 的耐水性能提高。

RWS 耐水性能的提高，是重组木内部胶液分布均匀性提升和表面性能改善的共同作用结果。辊压树脂浸胶工艺使得重组木内部形成均匀的网状胶合结构，增强了重组木的胶合性能；同时胶液均匀地填充在细胞间隙和细胞裂隙中，并渗透到细胞腔、纹孔等，形成了更多的胶钉，从而有效抑制了细胞在吸水后的回弹。此外，RWS 表面粗糙度和润湿性的降低，也减少水分进入重组木内部的通道。因此，与 CWS 相比，RWS 的吸水膨胀率大幅度降低，表面跳丝现象明显减少，耐水性能显著提高，尺寸稳定性得到改善。

3　结　　论

本研究采用吊笼式浸胶和辊压树脂浸胶两种方法制备重组木，探究两种工艺对重组单元及胶液的分布流动的影响，通过比较重组木耐水性能变化，揭示浸胶工艺对重组木尺寸稳定性的影响，具体结论如下。

（1）与吊笼式浸胶法相比，辊压树脂浸胶工艺制备的重组木的耐水性能显著提高。RWS 在 63 ℃ 水泡 24 h 后的 TSR 和 WSR 分别为 5.47% 和 1.11%，与 CWS 相比降低幅度为 52.16%、50.09%；在 28 h 循环后的 TSR 和 WSR 分别为 6.24% 和 1.17%，相比 CWS 其降低幅度分别为 51.45% 和 58.51%。

（2）辊压树脂浸胶工艺制备的重组木的表面裂隙减少，粗糙度降低，表面亲水性官能团减少，表面润湿性降低。RWS 表面粗糙度 R_a 和 R_z 的下降幅度分别达到 34.38% 和 72.75%；接触角减小速度降低，接触角（第 20 s 时）的增大幅度达到 285.95%。

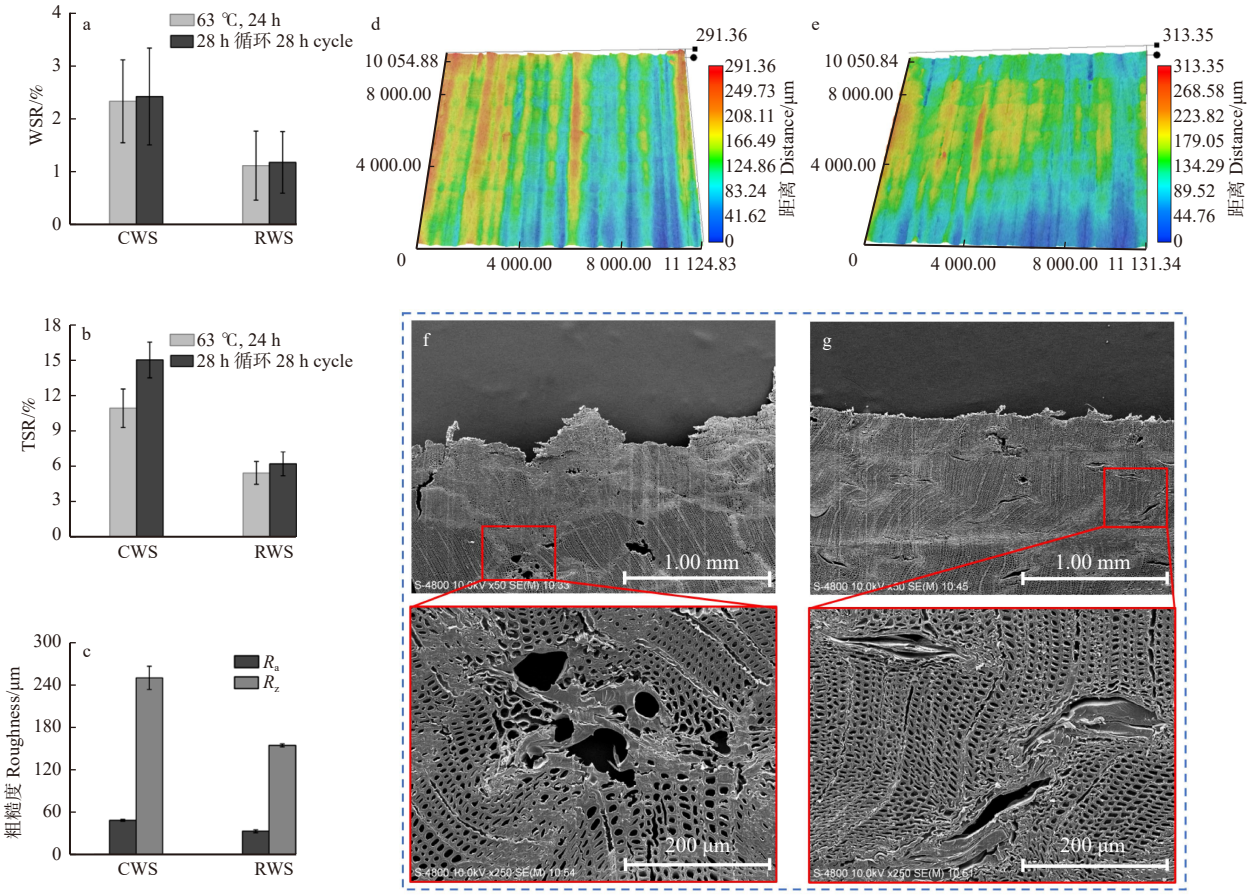


图 10 吸水宽度膨胀率 WSR(a)、吸水厚度膨胀率 TSR(b)、表面粗糙度(c)、表面形貌(d、e)和扫描电镜图(f、g)，以及 63℃ 水泡 24 h 后 CWS(d、f)和 RWS(e、g)

Fig. 10 Width swelling ratio WSR (a), thickness swelling ratio TSR (b), surface roughness (c), surface morphology (d, e) and SEM images (f, g), CWS (d, f) and RWS (e, g) after 63 ℃ soaking for 24 h

(3)辊压树脂浸胶工艺制备的重组木内部的胶液分布形成均匀的网状胶合结构。辊压树脂浸胶过程对木材细胞造成二次破坏，进一步分离薄弱的胞间层及导管，减小木纤维束直径、增加胶液进入木材的通道，使胶液填充于导管，更均匀地分散于重组单元内部，加强了胶合结构，提高了桉木重组木表面性能和耐水性能，使重组木尺寸稳定性得到改善。

参 考 文 献

[1] 李腊梅, 谢桂军, 曹永建, 等. 蒸汽热处理对桉木物理力学性能的影响 [J]. 林业与环境科学, 2022, 38(6): 74−80.
Li L M, Xie G J, Cao Y J, et al. Effect of steam heat treatment on physical and mechanical properties of eucalyptus[J]. Forestry and Environmental Science, 2022, 38(6): 74−80.

[2] 于文吉. 我国重组材料科学技术发展现状与趋势 [J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 1−7.
Yu W J. Current status and future trend of science and technology for reconstituted materials in China[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 1−7.

[3] 余养伦, 于文吉, 邓侃. 我国木 (竹) 质重组材料技术和产业发展现状及建议 [J]. 中国人造板, 2018, 25(6): 1−5.
Yu Y L, Yu W J, Deng K. Status quo and suggestions for China's scrimber production technology and its industry development[J]. China Wood-Based Panels, 2018, 25(6): 1−5.

[4] 余养伦, 于文吉. 桉树单板高值化利用最新研究进展 [J]. 中国人造板, 2009, 16(5): 7−12.
Yu Y L, Yu W J. Research progress on high value-added eucalyptus veneer[J]. China Wood-Based Panels, 2009, 16(5): 7−12.

[5] 雷文成, 张亚慧, 葛立军, 等. 结构用桉木重组木的适宜性制备工艺 [J]. 林业工程学报, 2022, 7(6): 46−52.
Lei W C, Zhang Y H, Ge L J, et al. Study on suitability manufacture process of structure eucalyptus scrimer[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(6): 46−52.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Gao Q, Lin Q Q, Huang Y X, et al. High-performance wood scrimber prepared by a roller-pressing impregnation method[J].

Construction and Building Materials, 2023, 368: 130404.

[9] Zhang Y, Huang X, Zhang Y, 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.

[10] 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. Effect 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.

[11] 吴萧. 杨树应拉木生长应变与材性关系的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
Wu X. Research on the relationship between growth strain and wood properties of poplar tension wood[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.

[12] 段新芳, 鲍甫成. 人工林毛白杨木材解剖构造与染色效果相关性的研究 [J]. 林业科学, 2001, 37(1): 112−116.
Duan X F, Bao F C. Relationship between wood structures and its wood dyeing effects of *Populus tomentosa* from plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(1): 112−116.

[13] 贺霞. 杨木高强度微波预处理特性与机理研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
He X. The research on characteristics and mechanism of poplar wood during high-intensity microwave pretreatment[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.

[14] 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.
Liang Y J. Study on the influence of manufacturing process on properties of fibrosis veneer scrimber[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.

[15] 王喆. 真空热处理落叶松材性变化规律及其机理研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
Wang Z. Study on properties and mechanism of larch wood modified by vacuum heat treatment[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.

[16] 黄尔卓. NaOH 溶液处理法制备木纤维工艺及无胶胶合机理研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
Huang E Z. Study on the preparation of wood fiber by NaOH solution treatment and its binder-free bonding mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.

[17] 高玉磊. 高温热处理杉木的吸湿吸水性变化规律及其机理研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
Gao Y L. Study on the changes and its mechanism of moisture adsorption and absorption properties of high temperature heat treated Chinese fir wood[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.

[18] 韦亚南. 基于热处理单板的重组木性能及光老化机制研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
Wei Y N. Study on the UV photo aging mechanism and properties of scrimber based on heat-treated veneers[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.

[19] Garrote G, Domínguez H, Parajó J C. Study on the deacetylation of hemicelluloses during the hydrothermal processing of Eucalyptus wood[J]. HolzalsRohund Werkstoff, 2001, 59(1−2): 53−59.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　于志民）