

压缩率对杨木重组木表面硬度的影响

贺颖奇¹, 卢勤², 张亚梅¹, 余养伦¹, 于文吉¹

(1 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2 洪雅竹元科技有限公司, 四川洪雅 620366)

摘要: 【目的】以人工速生林杨木为研究材料, 采用定向重组技术开发高硬度重组木, 揭示压缩率对杨木重组木表面硬度的影响规律, 以为杨木的表面改性和重组木制备工艺的优化提供可靠的方法和科学依据。【方法】采用定向重组技术制备压缩率为 1.00、1.22 和 1.44 的三种杨木重组木, 并以杨木、红榉和俄罗斯柞木作为对照样, 采用万能力学试验机测定三种木材和三种不同压缩率杨木重组木样品表面的金氏硬度值; 采用超景深三维显微镜、场发射扫描电镜观察样品表面的宏观和微观形貌, 以及样品测试金氏硬度过程中破坏面的宏观和微观形貌; 采用压汞法 (MIP) 测试样品孔隙率; 采用激光共聚焦显微镜 (LSCM) 和透射电子显微镜 (TEM) 表征酚醛树脂在重组木内的分布情况。【结果】实验结果表明: 杨木重组木的金氏硬度值随着压缩率的增大而增大。与杨木相比, 压缩率为 1.44 的重组木的金氏硬度值增加了 12.63 倍, 其硬度高于俄罗斯柞木和红榉的硬度。通过分析金氏硬度的应力应变曲线表明: 压缩率越大, 重组木的比例极限应力越大。通过扫描电镜和超景深显微镜观察可知: 杨木原木的破坏面呈韧性断裂, 而制备的重组木随着压缩率的增大其破坏模式逐渐变成脆性断裂。通过压汞法 (MIP) 测试样品孔隙率可知: 定向重组显著降低了杨木的孔隙率, 压缩率越大, 重组木的孔隙率越低。通过激光共聚焦显微镜和透射电镜观察可知: 随着压缩率的增加, 树脂沿胶层带分布的宽度和深度逐渐增加, 并且渗透到导管、木射线和纤维细胞的细胞腔中。重组木表面硬度的增大, 主要是因为: 杨木经过定向重组后, 其导管和木纤维细胞被压缩密实, 孔隙率降低, 单位体积内的细胞实质密度增加, 细胞之间的结合面积增大, 连接更为紧密。同时, 引入的 PF 树脂不仅将压缩的细胞结构固定, 而且通过形成的胶钉, 提高了细胞之间的连接强度, 从而赋予重组木表面较高的硬度。【结论】定向重组技术可以有效解决速生人工林杨木材质软、表面硬度低的问题, 并且可通过控制压缩率调控重组木硬度, 以满足不同应用场景对材料硬度的需求。

关键词: 速生杨木; 定向重组; 压缩率; 硬度; 重组木

Effect of compression ratios on the surface hardness of poplar wood scrimber

Yingqi He¹, Qin Lu², Yamei Zhang*, Yanglun Yu¹, Wenji Yu¹

(1 Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2 Hongya Bambooera Technology Co., Ltd, Sichuan Province, 620366)

Abstract: 【Objective】In order to provide reliable methods and scientific basis for the modification of poplar wood surface and the optimization manufacturing process of wood scrimber, the directional recombination technology was applied to manufacture the wood scrimber of poplar with high-hardness, and then the effect of compression ratios (CR) on the surface hardness of wood scrimber was studied. 【Method】The wood scrimber with compression ratios of 1.00, 1.22 and 1.44 were prepared by the directional recombination technology, and the Poplar, Beech and Russian oak were taken as the control samples. The values of Janka hardness was measured by the universal mechanical testing machine. And the macroscopic and microscopic morphology of samples, as well as the damaged surface for samples during the testing process of Janka hardness were observed by ultra-depth-of-field three-dimensional microscope (UDTM) and field emission scanning electron microscope (SEM). Additionally, the porosity of the samples was tested by Mercury injection porosimetry (MIP) and distribution of Phenol-Formaldehyde resin (PF) within the wood scrimber was characterized by laser scanning confocal microscopy (LSCM) and transmission electron microscopy (TEM). 【Result】The experimental results showed that the Janka hardness values of wood scrimber increased with increasing compression ratios. The Janka hardness value of wood scrimber with compression ratio of 1.44 increased by 12.63 times compared with that of poplar wood. Furthermore, the Janka hardness value of wood scrimber was much higher than those of Russian oak and Beech. In practical applications, the appropriate compression ratio of

the wood scrimber can be determined according to the needs in different area. The analysis of stress-strain curve of Janka hardness showed that the proportional ultimate stress of wood scrimber increased with increasing compression ratio. The observation of SEM and UDTM revealed that the failure surface of poplar wood was ductile fracture, but changed to brittle fracture for the wood scrimber. The porosity of the samples tested by MIP showed that directed recombination technology significantly reduced the porosity of poplar wood, and the porosity of the wood scrimber decreased with increasing compression ratio. The observation of LSCM and TEM showed that the width and depth of PF resin distributed along the glue layer band gradually increased with increasing compression ratio and penetrated into the vessel, wood rays and fiber cells. The reasons for the increase in surface hardness of wood scrimber were as following: In the manufacturing process, the vessels and fiber cells of poplar wood were compressed, and the porosity of wood scrimber was reduced. Therefore, the parenchymal density of wood cells in per unit volume was increased. Additionally, the binding area between the wood cells is increased and the connections are tighter. Meanwhile, the PF not only fixed the compressed cell structure, but also increases the strength of the connection between the wood cells through the formed glue nails, which effectively improved the surface hardness of the wood scrimber. 【Conclusion】 The directional recombination technology can be applied to solve the soft problem and low surface hardness of poplar wood, and the surface hardness of the wood scrimber can be adjusted through the compression ratio, so that the products prepared by the directional recombination technology can meet the needs of different applications.

Keywords: Fast-growing poplar wood; directional reorganization; compression ratio; hardness; wood scrimber

杨木是我国重要的速生人工林树种之一，具有适应性广、生长速度快等特点，在我国南方和北方均有广泛的种植，据第九次全国森林资源清查结果（2018年），其种植面积为757万 hm^2 ，蓄积量为5.46亿 m^3 （国家林业和草原局，2019）。同时，杨木是我国制造人造板、纸浆造纸的主要原料，在保障人们对家具、地板、水泥模板等大宗木制品基本需求中发挥了重要的作用。然而，由于杨木材质软、易变形、表面起毛等缺陷，限制了其直接作为实木家具、建筑结构材等高端木制品应用的可能性，目前主要应用于胶合板芯板(Bal *et al.*, 2015)、细木工板芯板、纤维板(Xing *et al.*, 2006)、刨花板(Baharoğlu *et al.*, 2013)、纸浆等产品领域。

重组木是以不打乱纤维排列方向、保留木材基本特性为前提，将木材疏解成木纤维束后再采用树脂胶合和定向重组制备而成的一种新型的木质复合材料。定向重组技术不仅改善了杨木的物理力学性能(Sun *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2019a; Yu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017)，还赋予了重组木疏水(Jiang *et al.*, 2022)、阻燃(Gao *et al.*, 2023)、防腐(Bao *et al.*, 2022)、颜色调控(Liu *et al.*, 2023)等新功能，使得重组木具有性能可控、规格可调、产品可设计的特点，可用于替代部分优质硬阔叶材用于地板、家具、门窗、户外景观等领域，具有广阔的应用前景。

采用定向重组工艺制备重组木技术中，压缩率是影响重组木性能的重要因子。不同的压缩率制备的重组木，其物理力学性能发生了显著的改变。通常，随着压缩率的增大，重组木的主要力学性能（如抗弯强度、抗弯模量和水平剪切强度）逐渐增大，而吸水厚度膨胀率呈现先增大后降低的趋势(Bao *et al.*, 2016; Bao *et al.*, 2019; He *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2019b; Yu *et al.*, 2015)。材料的表面硬度，指材料表面抵抗其它刚体压入材料的能力(Oberle *et al.*, 2014)。硬度是评价材料性能优劣的重要指标，对材料的刨、钻、铣、锯等加工性能和抗冲击、撞击、磨损等使用性能具有重要的影响。然而，压缩率对重组木表面硬度的影响鲜有报道。

本文以人工速生林杨木为研究材料，采用定向重组技术制备压缩率为1.00、1.22和1.44的重组木，通过金氏(Janka)硬度测试材料的表面硬度，研究压缩率对杨木重组木表面金氏硬度的影响规律；采用扫描电子显微镜(SEM)观察杨木和重组的微观形貌和破坏形貌；通过激光共聚焦显微镜(LSCM)和透射电子显微镜(TEM)表征酚醛树脂在重组木中的分布。在上述研究的基础上，阐明杨木不同压缩率条件下微观构造变化和选择性增强机制，揭示重组木表面增硬机理，以期为杨木表面改性和重组木的制备工艺的优化提供可靠方法和科学依据。

1. 材料与方法

1.1 材料

杨木 (*Populus ussuriensis*), 产自山东临沂蒙山林场, 树龄 8 年, 胸径 20cm, 气干密度为 0.45g/cm³, 气干含水率为 9.61%。

选取俄罗斯柞木 (*Quercus Russian*) 和红榉 (*Fagus*) 作为对照样, 均购置于天津木方原木木材加工厂。俄罗斯柞木: 树龄 55~60 年, 胸径 30~45cm, 气干密度 0.83g/cm³; 红榉: 树龄 25~36 年, 胸径 25~30cm, 气干密度 0.60g/cm³。

酚醛树脂 (Phenol-Formaldehyde resin, PF), 购自太尔胶粘剂 (广东) 有限公司, 其基本参数如下: 固含量为 52.29%, 粘度为 67.5Pa·s (25℃), 水溶倍数为 20 倍, PH 值为 9.71。

1.2 不同压缩率杨木重组木的制备

杨木重组木的制备工艺流程如下:

原木 → 旋切 → 厚单板 → 剪裁 → 疏解 → 纤维化单板 → 干燥 → 浸胶 → 干燥 计量
组坯 → 热压 → 重组木 →

将原木旋切成 6mm 厚的单板后, 通过疏解机疏解成纤维化木单板 (厚度约为 5.23 mm), 纤维束的直径为 2~3 mm。采用 5min 吸水率法对纤维化木单板的疏解度进行表征 (Zhang *et al.*, 2018)。经测试得此单板 5min 的吸水率为 121.40%。

将 PF 配置成固含量为 18% 的胶液, 通过浸渍法对纤维化单板施胶, 控制单板的施胶量为 15%。施胶后的单板干燥至含水率为 10~12%。单板计量称料后, 采用热压法 (“热进冷出”工艺) 进行定向重组, 热压温度设置为 145℃, 热压时间为 1min/mm。在热压过程中, 通过热压压力控制单板的压缩率分别为 1.00、1.22 和 1.44, 从而得到制备的重组木的密度分别为 0.90 g/cm³、1.00 g/cm³ 和 1.10 g/cm³。

$$\text{压缩率} = \frac{H_{\text{杨木}} - H_{\text{重组木}}}{H_{\text{重组木}}}$$

H 分别为杨木单板的铺装厚度和其定向压缩后制备的重组木的厚度。制备的重组木放置在大气状态下平衡后, 通过干燥法测定其含水率为 10.93%。将平衡后的重组木锯截试件, 采用 400 目的砂纸对试件表面进行砂光处理后, 测试其金氏硬度, 以杨木原木、俄罗斯柞木和红榉作为对样品。

1.3 试验方法

1.3.1 金氏硬度测试

参照 GB/T 1941-2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 19 部分: 硬度测定》, 采用万能力学试验机 (ETM 105D, 深圳万测) 测定杨木、俄罗斯柞木、红榉以及不同压缩率的重组木表面的金氏硬度。测试过程中, 采用直径为 (5.64±0.01) mm 的半球形钢制压头, 以 3mm/min 的速度将压头压入试材的表面, 压入深度为 2.82mm, 每种条件的样品总共测试 6 个硬度值, 结果取平均值。

硬度测试结束后, 采用超景深三维显微镜 (UDTM, VHX-7000 日本) 和场发射扫描电镜 (SEM, SU8600) 观察样品破坏面的宏观和微观形貌。

1.3.2 样品表面微观形貌表征

采用半自动切片机 (RM2245, LEICA, 德国) 切平杨木样品的横切面和径切面、重组木的横切面 (垂直于纹理方向) 和压缩面 (厚度方向) (如图 1 所示), 通过场发射扫描电镜观察其微观形貌。

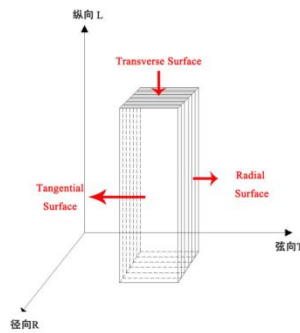


图 1 重组木取样示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling

1.3.3 样品孔隙率测试

采用压汞法 (Mercury intrusion porosimetry, MIP) (Micromeritics instrument Corporation, 美国) 测试样品的孔隙率。试样尺寸为 8mm×8mm×20mm (长×宽×高), 在最大压力为 413.76MPa 的条件下测试。每个条件测试三个样品, 结果取平均值。

1.3.4 重组木中酚醛树脂分布表征

(1) 采用激光共聚焦显微镜观察

采用半自动切片机 (RM2245, LEICA, 德国) 切取杨木和重组木横、径切片, 切片厚度为 20 μm。将得到的切片在浓度为 0.5% 的甲苯胺蓝溶液中染色 5min 后, 分别用质量分数为 20%、40%、60%、75%、85%、95%、100% 的乙醇溶液梯度脱水 5min。染色后的切片通过激光共聚焦显微镜 (Leica Microsystems, Bannockburn, IL, 德国) 观察胶液在重组木中分布情况。利用徕卡共聚焦软件 (Coherent, Santa Clara, CA, 德国) 对所得图片进行重建。

(2) 采用透射电镜观察

将杨木和重组木软化并采用 Spurr 树脂包埋后, 采用超薄切片机 (UC6, LEICA, 德国) 切取 80 nm 厚的横切片, 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分布情况。

2. 结果与讨论

2.1 压缩率对重组木金氏硬度的影响

2.1.1 压缩率对重组木金氏硬度值的影响

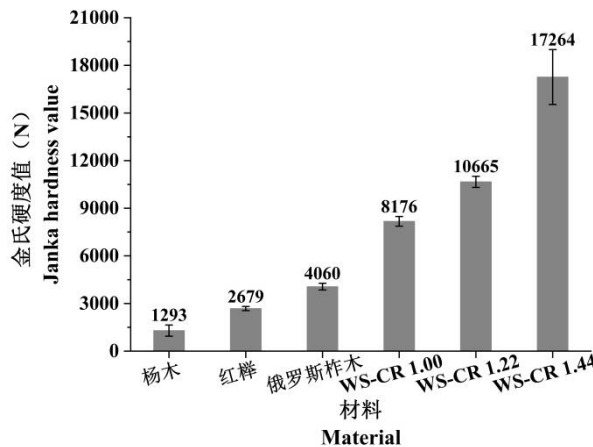


图 2 3 种木材和 3 种压缩率重组木 (WS) 的金氏硬度值

Fig.2 The Janka hardness values of wood samples and wood scrimber (WS) with different compression ratios (CR)

3 种木材和重组木的金氏硬度值如图 2 所示。杨木经过定向重组技术制备的重组木, 其表面硬度显著高于杨木; 而且随着压缩率的增大, 重组木的表面硬度呈逐渐上升的趋势。当压缩率分别为 1.00、1.22 和 1.44 时, 制备的重组木对应的密度分别为 0.90g/cm³、1.00g/cm³ 和 1.10g/cm³, 相对于原木其表面金氏硬度值的增

大幅度达到532.33%、724.83%和1235.19%。其表面金氏硬度值高于榉木（家具常用木材）和柞木（地板常用木材），达到了优质硬阔叶材的硬度指标要求，并且可通过控制压缩率调控重组木硬度，以满足不同应用场景对材料硬度的需求。此外，通过方差分析（表1）可知，杨木和重组木、以及不同压缩率的重组木之间的金氏硬度值在0.05水平上差异显著。

表 1 压缩率对重组木表面金氏硬度影响的方差分析

Table 1 Variance Analysis of the influence of compression ratio on the surface hardness of wood scrimber

因变量 Dependent variable	误差来源 Error source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean Square	F	P
硬度 Hardness	压缩率 Compression ratio	783911431.681	3	261303810.560	314.326	0.000
	误差 Error	16626276.249	20	831313.812		
	总计 Total	800537707.930	23			

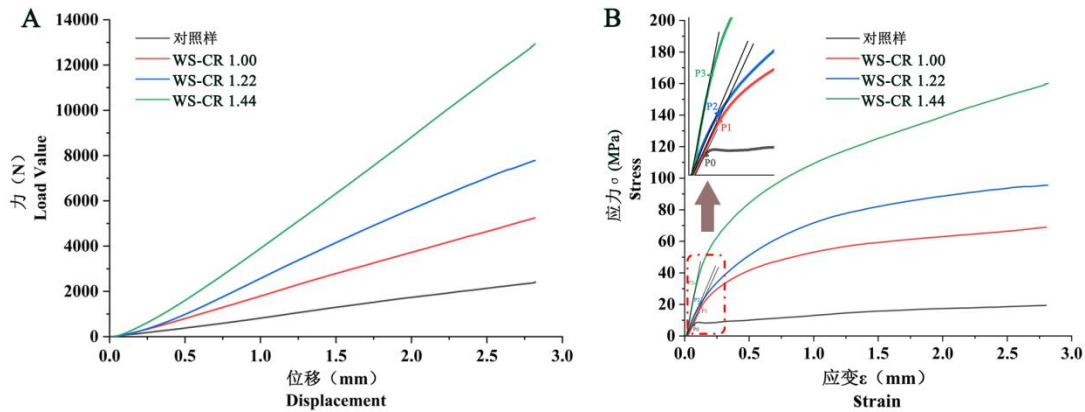


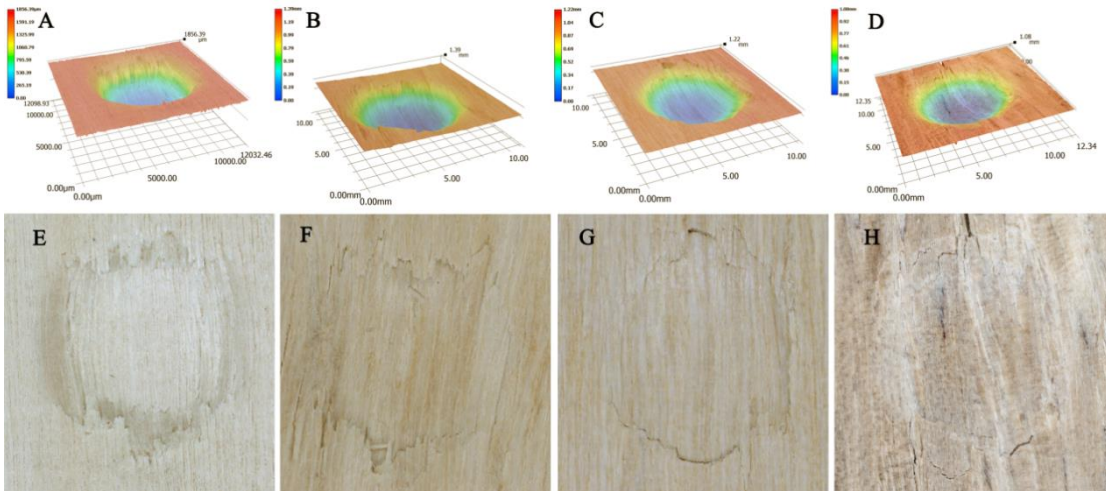
图 3 杨木和重组木 (WS) 的力-位移曲线 (A) 和应力-应变曲线 (B)

Fig. 3 Force-displacement curve (A) and stress-strain curve (B) of poplar wood and wood scrimber

杨木和重组木的金氏硬度值测试时的载荷-位移曲线和应力-应变曲线，如图 3 所示。由载荷-位移曲线（图 3A）可知，杨木和重组木的抗压载荷随着位移的增大呈直线上升的趋势。与原木相比，重组木的载荷-位移曲线的斜率显著增大；而且重组木的载荷-位移曲线的斜率随着压缩率的增大而增大。由应力-应变曲线（图 3B）可知，杨木经过定向重组技术制备的重组木，抗压比例极限点 P 增大；而且比例极限值随着重组木压缩率的增大而增大。在金氏硬度测试过程中重组木未出现屈服行为，说明本实验条件下重组木未有劈裂现象。

2.1.2 压缩率对重组木表面硬度测试破坏形貌的影响

通过超景深显微镜观察杨木和重组木硬度测试后的表面形貌，如图 4 所示。杨木在压头载荷的作用下出现明显的凹坑，断裂方式为韧性断裂（图 4A）。凹坑四周的木材出现错位断层的现象（图 4B），表面有较大的起伏，这表明木材断裂过程中裂纹在扩展时伴有较大的塑性变形。杨木经定向重组制备成重组木后，硬度测定中压头载荷形成的凹坑深度明显降低（图 4B-D），这说明在载荷撤去后被压的部位发生部分回弹，回弹程度随着重组木压缩率的增大而增大（表 2）。当重组木的压缩率为 1.00 时，凹坑四周的木材断层明显减少（图 4 F）；当重组木的压缩率分别为 1.22 和 1.44 时，凹坑周围未出现明显木材断层，四周有整齐的裂缝（图 4G-H），断裂方式为脆性断裂。



(A,E) -原木; (B,F) -压缩率为 1.00 的重组木; (C,G) -压缩率为 1.22 的重组木; (D,H) -压缩率为 1.44 的重组木; (A, E)-Polar wood; (B, F) - wood scrimber with a compression ratio of 1.00; (C, G) -wood scrimber with a compression ratio of 1.22; (D, H) -wood scrimber with a compression ratio of 1.44

图 4 超景深图：杨木和重组木破坏面的形貌

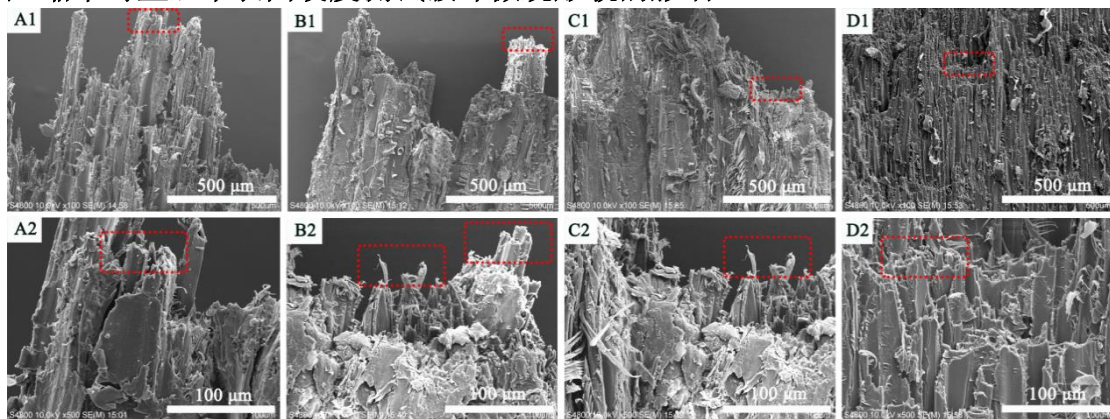
Fig.4 The UDTM images: the damaged surface morphology of poplar wood and wood scrimber

表 2 杨木和重组木的压痕深度和回弹深度

Table 2 Indentation depth and rebound depth of poplar wood and wood scrimber

材料 Material	压痕深度 Indentation depth	回弹深度 Rebound depth
原木 Poplar wood	1.85	0.97
重组木-压缩率为 1.00 Wood scrimber with a compression ratio of 1.00	1.39	1.43
重组木-压缩率为 1.22 Wood scrimber with a compression ratio of 1.22	1.22	1.60
重组木-压缩率为 1.44 Wood scrimber with a compression ratio of 1.44	1.08	1.74

2.1.3 压缩率对重组木表面硬度测试破坏微观形貌的影响



(A1, A2) -原木; (B1, B2) -压缩率为 1.00 的重组木; (C1, C2) -压缩率为 1.22 的重组木; (D1, D2) -压缩率为 1.44 的重组木; (A1, A2)- Polar wood; (B1, B2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.00; (C1, C2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.22; (D1, D2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.44

图 5 SEM 图：重组木表面硬度测试破坏的微观形貌

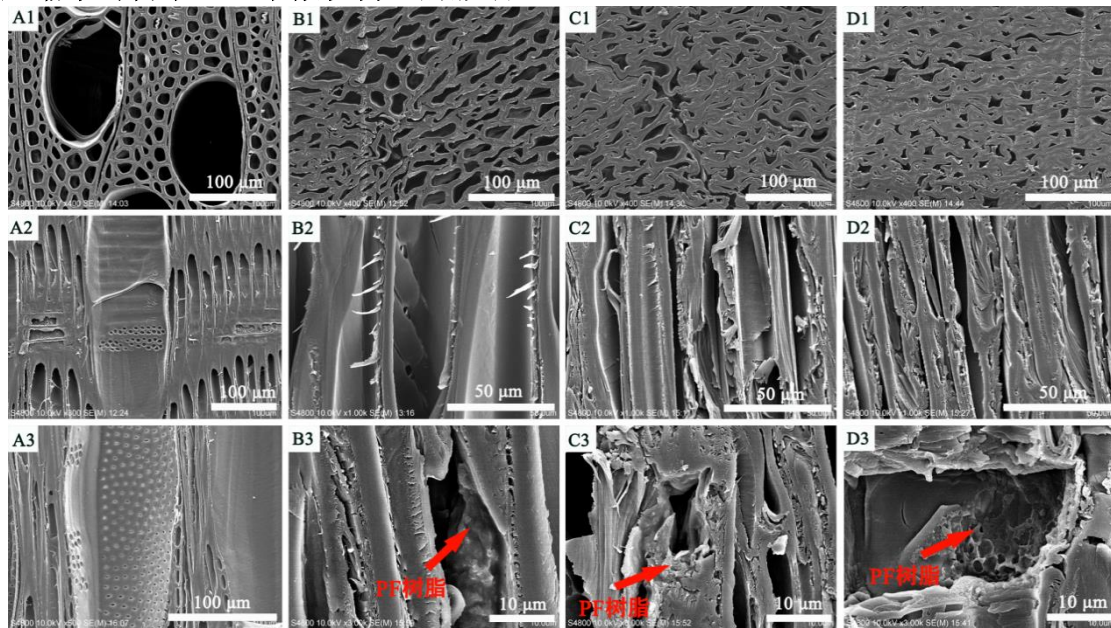
Fig.5 SEM images: the micro morphology of damaged surface of poplar wood and wood scrimber

为了进一步分析压缩率对重组木硬度的影响，通过扫描电镜观察杨木和重组木硬度测试后的微观破坏形貌，如图 5 所示。对于杨木原木，当半球型钢压头压入其表面时，压头四周的木材受到拉伸力的作用，

导致细胞壁分层断裂，纤维细胞在断裂过程中出现撕扯现象，导管出现通体劈裂。对于重组木，随着压缩率的增大，在硬度测试过程中其破坏模式由撕裂逐渐变成脆裂。被 PF 树脂填充的导管和纤维细胞呈现齐头断裂现象，尤其是当压缩率为 1.44 时，重组木断裂面的细胞整齐规整。试验结果表明，杨木经定向重组后制备的重组木，在圆球压力的作用下其断裂面的破坏模式发生了改变，即由韧性断裂变成脆性断裂。

2.2 压缩率对杨木重组木微观构造及胶液分布的影响

2.2.1 压缩率对杨木重组木微观构造的影响



A1-D1 为横切面，A2-D2 为杨木的径切面和重组木厚度方向切面（压缩面），A3-D3 为杨木弦切面和重组木宽度方向切面；(A1, A2, A3) -原木；(B1, B2, B3) -压缩率为 1.00 的重组木；(C1, C2, C3) -压缩率为 1.22 的重组木；(D1, D2, D3) -压缩率为 1.44 的重组木；A1-D1 are the cross sections of samples, A2-D2 are the radial section and compression sections of poplar wood and wood scrimber, respectively, and A3-D3 are the tangential section and width sections of poplar wood and wood scrimber, respectively; (A1, A2, A3) -Polar wood; (B1, B2, B3) -wood scrimber with a compression ratio of 1.00; (C1, C2, C3) -wood scrimber with a compression ratio of 1.22; (D1, D2, D3) -wood scrimber with a compression ratio of 1.44

图 6 杨木和重组木的微观形貌

Fig.6 The micro-morphology of poplar wood and wood scrimber

为了进一步剖析压缩率对杨木重组木表面硬度的影响规律，采用扫描电镜对杨木和不同压缩率重组木的微观结构进行观察，如图 6 所示。从图 6A1 可以看出，在杨木的横切面、径切面都能观察到腔大壁薄的导管；而且，木纤维细胞也存在明显的细胞腔，壁层较薄，说明速生林杨木中存在大量的孔隙，细胞之间结合疏松。由图 6 (B1-D1, B2-D2) 可以看出，杨木经过定向重组后，导管和纤维细胞的细胞腔被压缩密实，细胞之间的结合面积增大，连接更为紧密；并且随着压缩率的增大，压缩密实程度增加，单位体积内的细胞实质密度增加。由图 6 (B3-D3) 可知，杨木经过定向重组后，在重组木的细胞腔、胞间层中有酚醛树脂分布，在细胞腔和胞间层之间形成胶钉连接。

2.2.2 压缩率对杨木重组木孔隙率的影响

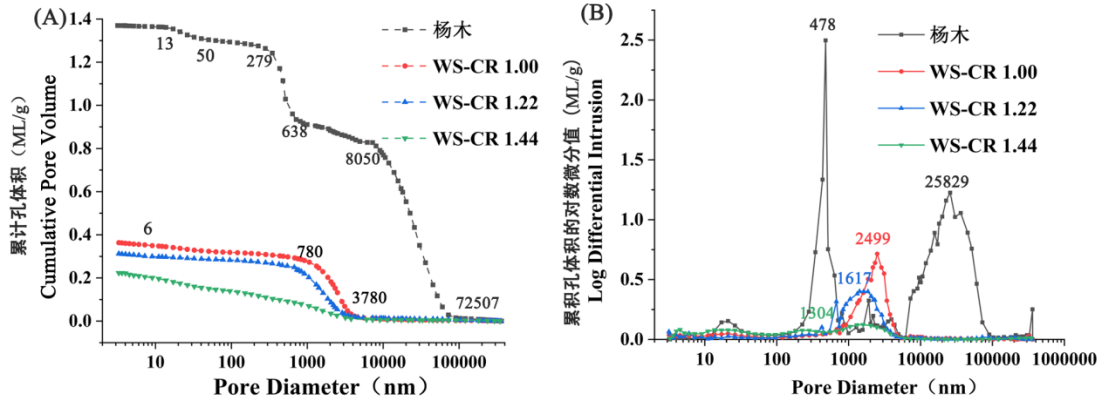


图 7 杨木和重组木的累计孔体积与孔隙直径的关系 (A) 和累计孔体积随孔径的对数微分与孔隙直径的关系 (B)

Fig.7 Cumulative Intrusion vs Pore size (A) and Log Differential Intrusion vs Pore size (B) of poplar wood and wood scrimber

表 3 杨木和重组木的孔隙特征参数

Table 3 The pore characteristic parameters of poplar wood and wood scrimber

材料	压入汞的总体积 Total intrusion volume (mL/g)	平均孔径 Average pore diameter (4V/A)/nm	孔隙率 Porosity(%)
杨木 Poplar wood	1.3697	285.52	65.1952
重组木-压缩率为 1.00 Wood scrimber with a compression ratio of 1.00	0.4486	82.23	37.8821
重组木-压缩率为 1.22 Wood scrimber with a compression ratio of 1.22	0.3132	50.70	30.8979
重组木-压缩率为 1.44 Wood scrimber with a compression ratio of 1.44	0.2236	30.40	24.3674

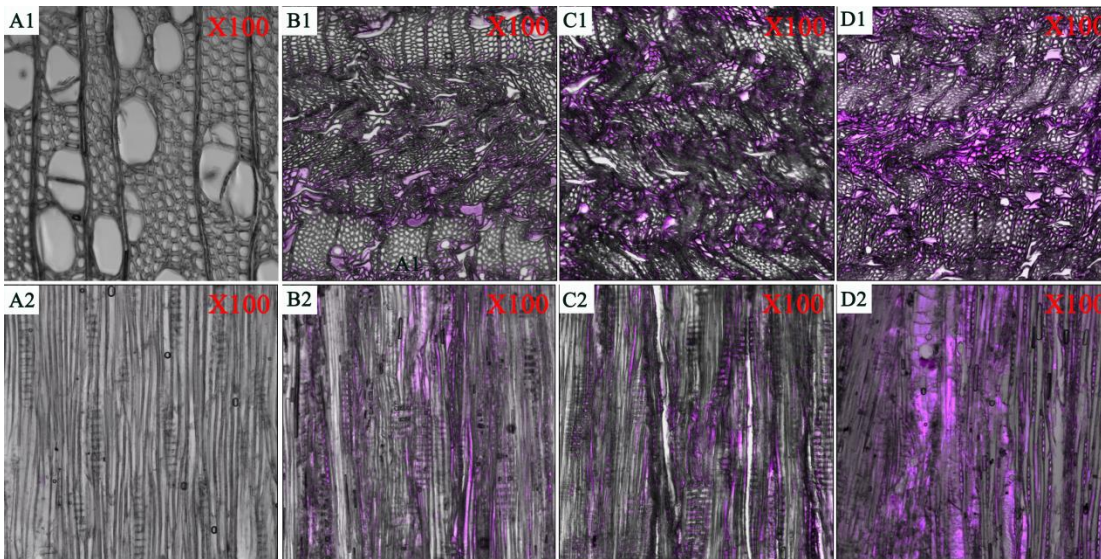
杨木是一种多孔材料，主要由导管、纤维细胞等组成，导管和纤维细胞的体积占杨木总体积的 90-96%(Bao *et al.*, 2017)。根据扫描电镜观察 (图 6A)，其导管和纤维细胞的直径在 15-250 μm 之间。杨木经过定向重组制备成重组木后，其细胞形态发生显著变化。通过压汞法测试的杨木和重组木的汞注入体积与孔隙直径的关系和累积孔体积随孔径的对数微分与孔径的关系，如图 7 所示；杨木和重组木的孔隙特征参数如表 3 所示。

由表 2 可知，相对于杨木，重组木中的孔隙体积、平均孔径和孔隙率等孔隙参数显著降低。当重组木的压缩率为 1.44 时，降低幅度分别为 83.68%、89.35%和 62.62%。而且，随着压缩率的增加，重组木的孔隙体积、平均孔径和孔隙率等孔隙参数呈逐渐减小的趋势。

由图 7 (A) 可知，杨木原木和重组木的孔径范围分别为 32 nm-80 μm 和 10 nm-10 μm，这说明杨木经定向重组后其孔径范围减小。在孔隙直径 279~72507nm 范围内，杨木原木累计孔体积比重组木多 410%。在原木中，孔隙直径在 13~50、50~279、279~638、638~8050 和 8050~72507 范围内的孔体积分别占总体积的 4.44%、2.96%、22.22%、11.11%和 57.78%；在重组木中，孔隙直径在 6~780、780~3780 和 3780~72507 范围内的孔体积分别占总体积的 17.14%、71.43%和 2.86%。此外，在相同孔径下，重组木的累计孔体积随着压缩率的增加而逐渐减小。

由图 7 (B) 可知，杨木的孔隙频率分布曲线为多峰特征，其峰值孔径分别为 25.8 μm 和 478 nm，其中，25.8 μm 处的峰值主要对应杨木中的导管孔径；478nm 处的峰值主要对应杨木中的纤维细胞腔孔径。重组木的孔隙频率分布曲线为单峰特征，其峰值孔径范围为 1500 nm-2500 nm 之间，杨木制备成重组木后在 25.8 μm 和 478 nm 处的波峰消失，表明杨木中的导管和纤维细胞腔在定向重组过程中被逐渐压缩、密实，孔隙分布由大孔 (直径 >50nm) 向中孔 (2nm < 直径 < 50nm) 转变。同时，随着压缩率的增加，重组木的峰值孔径逐渐向孔隙直径较小的方向移动，表明压缩率越大，重组木内细胞组织被压缩的越密实。

2.2.3 压缩率对杨木重组木胶液分布的影响

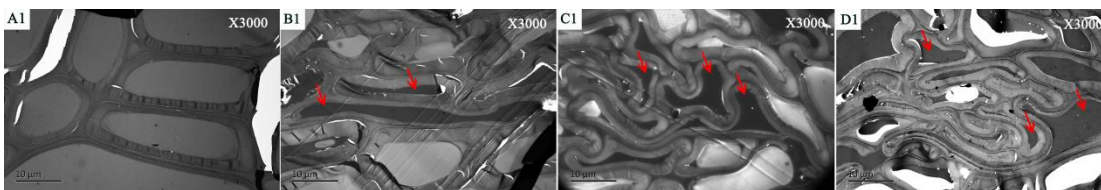


A1-D1 为横切面, A2-D2 为径切面; (A1, A2) -原木; (B1, B2) -压缩率为 1.00 的重组木; (C1, C2) -压缩率为 1.22 的重组木; (D1, D2) -压缩率为 1.44 的重组木; A1-D1 are the cross sections of samples, A2-D2 are the diameter section of samples; (A1, A2) -Polar wood; (B1, B2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.00; (C1, C2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.22; (D1, D2) -wood scrimber with a compression ratio of 1.44

图 8 激光共聚焦图: 重组木内胶液的分布

Fig.8 The LSCM images:Distribution of PF resin in wood scrimber

采用激光共聚焦显微镜观察酚醛树脂胶剂在重组木内的分布情况, 如图 8 所示。当压缩率为 1.00 时, 酚醛树脂主要分布在纤维化单板之间的胶层带周围。随着压缩率的增加, 导管和纤维细胞逐渐被压缩, 酚醛树脂沿胶层带分布的宽度和深度逐渐增加。当压缩率为 1.44 时, 酚醛树脂相对均匀的分布在重组木胶层带之间, 此时大部分胶粘剂分布在疏解形成的裂缝、纤维细胞腔内部及导管中。



A1-D1 为横切面, A1-原木; B1-压缩率为 1.00 的重组木; C1 压缩率为 1.22 的重组木; D1-压缩率为 1.44 的重组木; A1-D1 are the cross sections of samples, A1-Polar wood; B1, B2-wood scrimber with a compression ratio of 1.00; C1-wood scrimber with a compression ratio of 1.22; D1-wood scrimber with a compression ratio of 1.44

图 9 透射电镜图: 重组木内的胶液分布

Fig.9 The TEM images: Distribution of PF resin in wood scrimber

采用透射电镜观察重组木内胶液的分布如图 9 所示, 酚醛树脂在细胞腔内的分布如红色箭头所示。由图可知, 胶液在纤维细胞腔和导管内形成胶钉, 并在细胞壁的内表面形成胶膜。随着压缩率的增大, 杨木中的导管和纤维细胞细胞腔的压缩幅度增大, 且胶液的分布逐渐均匀。

2.2.4 压缩率和酚醛树脂对杨木重组木纤维细胞壁力学的影响

激光共聚焦显微镜和透射电镜图表明, 酚醛树脂胶不但能进入导管中, 附着在细胞腔内壁上, 还可以通过渗透进入细胞的各壁层及胞间层中(Furuno *et al.*, 2004), 固化后的酚醛树脂对重组木纤维细胞壁及胞间层纳米级孔隙进行填充和增强。团队前期研究表明, 杨木经过定向重组技术制备的重组木, 其纤维细胞壁硬度和弹性模量显著高于原木, 当重组木压缩率为 1.22、施胶量为 13%时, 其硬度和弹性模量相对于原木提高了 31.91%和 10.10% (鲍敏振, 2017)。同时, 酚醛树脂填充复合胞间层后使其硬度由原木的 329MPa

升高至 397MPa (Cao *et al.*, 2022), 对其起到增硬效果。酚醛树脂对木材细胞壁、胞间层等填充、润胀作用, 形成了不同尺度的锚钉、胶钉等机械结合力, 以及与细胞壁组分形成的氢键和化学键等作用, 形成了化学结合力(Wang *et al.*, 2022; 李萍等, 2021), 微观层面, 增强了杨木木材细胞壁尤其是胞间层的力学性能; 宏观上, 有效地改善了重组木的力学性能。

综上所述, 在定向重组过程中, 杨木细胞被压缩密实, 重组木单位体积内的细胞实质密度增加, 承载能力增强; 此外, 酚醛树脂的引入, 不仅将压缩的细胞结构固定, 而且通过胶钉的形成, 提高了细胞之间的连接强度, 尤其是渗透到细胞壁和胞间层中的酚醛树脂, 有效地提高了其硬度和弹性模量。因此, 杨木经过定向重组后, 其表面硬度显著增加。

3. 结论

本文采用定向重组工艺对速生杨木进行改良, 研究了压缩率对重组木表面硬度的影响。主要结论如下:

(1) 与杨木相比, 重组木的金氏硬度显著提高, 高于俄罗斯柞木和红榉的金氏硬度; 随着压缩率增加, 金氏硬度值增大, 当压缩率为 1.44 时, 其金氏硬度增加了 12.63 倍, 并且可通过控制压缩率调控重组木硬度, 以满足不同应用场景对材料硬度的需求。

(2) 杨木经过定向重组, 其导管和木纤维细胞被压缩密实, 单位体积内的细胞实质密度增加, 承载能力增强。同时, 随着压缩率的增加, 树脂沿胶层带分布的宽度和深度增加, 逐渐渗透进入导管、木射线和纤维细胞中。引入的 PF 树脂不仅填充了细胞中的孔隙, 而且通过形成的胶钉, 提高了细胞之间的连接强度, 尤其是渗透到细胞壁中的酚醛树脂, 提高了细胞壁的硬度, 从而赋予重组木表面较高的硬度。

参 考 文 献

- 鲍敏振. 2017. 户外用重组木的结构演变和防腐机理研究. 中国林业科学研究院.
- (Bao M Z. 2017. Study on the Structural Evolution and Anticorrosion Mechanism of Scrimber for Outdoor Use. Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 国家林业和草原局. 2019. 中国森林资源报告 (2014—2018). 北京: 中国林业出版社.
- (National Forestry and Grassland Administration. 2019. China forest resources report (2014-2018). Beijing: China Forestry Publishing House. [in Chinese])
- 李萍, 张源, 吴义强, 等. 2021. 基于原位浸渍法的酚醛树脂改性杉木木材研究. 材料导报, 35(22):22193-22199.
- (Li P, Zhang Y, Wu Y Q, *et al.* 2021. Study on Phenol Formaldehyde Resin Modified Chinese Fir Wood Based on In-situ Impregnation Method. Materials Reports, 35(22):22193-22199. [in Chinese])
- Baharoğlu M, Nemli G, Sarı B, *et al.* 2013. Effects of anatomical and chemical properties of wood on the quality of particleboard. Composites Part B: Engineering 52:282-285.
- Bal B C, Bektaş İ, Mengeloğlu F, *et al.* 2015. Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric. Construction and Building Materials 101:952-957.
- Bao M Z, Huang X A, Jiang M L, *et al.* 2017. Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). Journal of Wood Science 63(6): 591-605.
- Bao M Z, Huang X A, Zhang Y H, *et al.* 2016. Effect of density on the hygroscopicity and surface characteristics of hybrid poplar compreg. Journal of Wood Science 62(5):441-451.
- Bao M Z, Li N, Huang C J, *et al.* 2019. Fabrication, physical-mechanical properties and morphological characterizations of novel scrimber composite. European Journal of Wood and Wood Products 77(5):741-747.
- Bao M Z, Tang R, Bao Y, *et al.* 2022. Changes in Chemical Composition, Crystallizability, and Microstructure of Decayed Wood-Fiber-Mat-Reinforced Composite Treated with Copper Triazole Preservative. Forests 3(9): 1387.
- Cao Y Z, Xu C H, Zhang Q J, *et al.* 2022. An in-situ microscale investigation into the fracture of wood-adhesive interphase by nanoindentation. Construction and Building Materials 346:128393.

- Furuno T, Imamura Y, Kajita H. 2004. The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Science and Technology* 37(5):349-361.
- Gao Q, Lin Q Q, Huang Y X, *et al.* 2023. High-performance wood scrimber prepared by a roller-pressing impregnation method. *Construction and Building Materials* 368: 130404.
- He M J, Zhang J, Li Z, *et al.* 2016. Production and mechanical performance of scrimber composite manufactured from poplar wood for structural applications. *Journal of Wood Science* 62(5):429-440.
- Jiang H, Wang L, Liu Q, *et al.* 2022. Superhydrophobic Poplar Scrimber Via In Situ Synthesis of $\text{Cu}_7\text{Cl}_4(\text{OH})_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Heterostructure Inspired by Pine Cone with Superultraviolet Resistance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 10(49): 16169-16181.
- Liu S Q, Huang Y X, Lin Q Q, *et al.* 2023. Discoloration of Eucalyptus wood veneer based on the immobilization of polyphenols by ferrous ions. *Industrial Crops and Products* 193: 116189
- Oberle B, Dunham K, Milo A M, *et al.* 2014. Progressive, idiosyncratic changes in wood hardness during decay: Implications for dead wood inventory and cycling. *Forest Ecology and Management* 323:1-9.
- Sun X F, He M J, Liang F, *et al.* 2021. Experimental investigation into the mechanical properties of scrimber composite for structural applications. *Construction and Building Materials* 276:122234.
- Wang J F, Yao Y, Huang Y Q, *et al.* 2022. Effects of the combination of compression and impregnation with phenolic resin on the dimensional stability in the multiscale wood structure of Chinese fir. *Construction and Building Materials* 327:126960.
- Wei J G, Rao F, Zhang Y H, *et al.* 2019a. Laminating wood fiber mats into a densified material with high performance. *Materials Letters* 253:358-361.
- Wei Y N, Rao F, Yu Y L, *et al.* 2019b. Fabrication and performance evaluation of a novel laminated veneer lumber (LVL) made from hybrid poplar. *European Journal of Wood and Wood Products* 77(3):381-391.
- Xing C, Zhang S Y, Deng J, *et al.* 2006. Medium-density fiberboard performance as affected by wood fiber acidity, bulk density, and size distribution. *Wood Science and Technology* 40(8):637-646.
- Yu H X, Fang C R, Xu M P, *et al.* 2015. Effects of density and resin content on the physical and mechanical properties of scrimber manufactured from mulberry branches. *Journal of Wood Science* 61(2):159-164.
- Yu Y L, Huang X A, Yu W J. 2014. A novel process to improve yield and mechanical performance of bamboo fiber reinforced composite via mechanical treatments. *Composites Part B: Engineering* 56:48-53.
- Zhang Y H, Qi Y, Huang Y X, *et al.* 2018. Influence of veneer thickness, mat formation and resin content on some properties of novel poplar scrimbers. *72(8):673-680.*
- Zhang Y M, Huang X A, Zhang Y H, *et al.* 2017. Scrimber board (SB) manufacturing by a new method and characterization of SB's mechanical properties and dimensional stability. *Holzforschung* 72.