

研究与开发

强化单板制备及其物理力学性能

吴玉章¹, 吕建雄¹, 李坚²

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 东北林业大学, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 通过浸渍压缩方法制备杨木强化单板, 提高单板的物理力学性能, 探讨单板压缩率、树脂含量(以单板增重率 WPG 表征)等对杨木强化单板性能的影响。结果表明: 在试验范围内, 杨木强化单板的物理力学性能比普通单板大幅提高; 提高单板压缩率与 WPG, 可有效抑制单板变形回弹, 并改善其力学性能; 杨木强化单板的胶合性能良好, 能够满足特殊用途胶合板用材的要求。

关键词: 木材改性; 强化单板; 压缩率; 增重率; 力学性能; 变形回复率

中图分类号: S781.7; S792.117 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2015)06-0005-04

Preparation and Properties of Densified Veneers

WU Yu-zhang¹, LV Jian-xiong¹, LI Jian²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Densified veneers were developed by resin impregnating and hot-pressing methods. Effects of compression ratio and weight percent gain (WPG) on properties of the veneers were discussed. The results showed that with increased compression ratio and WPG of the veneers, deformation recovery rate was decreased and mechanical properties including surface hardness, tensile strength and modulus were all improved. Bonding strength of plywood made with the densified veneers met the specifications of the National Standard GB/T 9846.3-2004. The authors concluded that the densified veneers could be used for making high performance plywood such as container substrates and parquet substrates as well as concrete formworks.

Key words: wood modification; densified veneers; compression ratio; weight percent gain (WPG); mechanical properties; deformation recovery rate

对于集装箱底板、混凝土模板、动车车厢底板、多层实木地板基材等特殊用途胶合板, 以及结构用单板层积材(LVL), 单板自身的物理力学性能对其最终产品性能有很大影响。以往这些板材的生产多采用

优质木材, 如集装箱底板用胶合板主要采用龙脑香(*Dipterocarpus* spp.)等东南亚产热带木材。而全球优质木材资源的枯竭以及来自 FSC 森林认证等压力的影响, 特殊用途胶合板可利用的资源越来越少, 寻求新的原料来源成为当务之急。

人工林由于生长速度快、轮伐期短, 可以提供大尺寸木材, 但其木材密度低、材质软、变异性大, 加工的单板通常物理力学性能较低, 不能直接作为特殊用途胶合板的替代资源, 但通过改性处理可以改善其性

收稿日期: 2015-02-13; 修改日期: 2015-10-12

基金项目: 林业公益性行业科研专项“木材低碳高效干燥与功能性改良关键技术研究”(201304502); 江苏省科技富民强县项目“杨木实木、单板的强化与尺寸稳定化处理技术研究与示范”(BN2014071)。

作者简介: 吴玉章(1966—), 男, 中国林科院木材工业研究所研究员。

能,从而提高人工林木材的利用价值。

在众多木材改性技术中,压缩处理是提高木材密度、力学强度的有效方法^[1-6]。笔者在前人研究基础上,采用浸渍压缩的处理方法对人工林杨木单板进行改性,考察单板压缩率和增重率对其物理力学性能的影响,以期制备出满足特殊用途胶合板要求的强化单板,为拓宽特殊用途胶合板原料开辟新径。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1) 杨木单板:毛白杨(*Populus tomentosa*)原木,树龄 10 年,产地河北。旋切成幅面 2 600 mm×1 300 mm、厚度 3 mm 的单板,经过自然干燥后,在热压机上展平处理。单板终含水率 8%~10%,平均密度 0.436 g/cm³。

2) 浸渍用水溶性酚醛树脂(PF)预聚物:自制,黏度 26 mPa·s(25℃),水稀释度 5%,pH 9.0,固体含量 45%。用水分别稀释至质量分数为 5%、10%、15%、20%的树脂溶液,备用。

3) 胶合板用树脂胶:两种,均自制。

① 酚醛树脂(PF)胶,固体含量 45%,黏度 900 mPa·s(25℃),pH 值 10.0;

② 三聚氰胺改性脲醛树脂(MUF)胶,固体含量 56%,黏度 100 mPa·s(25℃),pH 值 8.0。

1.2 主要设备

真空加压浸注装置,容积 0.5 m³,最高压力 30 MPa,最高真空度 0.1 MPa;试验压机,幅面尺寸 500 mm×500 mm;烘箱、万能力学试验机等。

1.3 试验方法

1.3.1 浸注树脂

将单板裁切成幅面尺寸为 300 mm×150 mm 的试样(以纤维方向为长度方向),每种质量分数的 PF 树脂溶液浸渍 15 块试样。

将试样浸渍在 PF 树脂溶液中,先抽真空(真空度 0.1 MPa)30 min,再在常压下浸渍 1 h,取出后称其质量。试样在室温晾干至含水率 20%左右,再经 60℃低温热风干燥,控制其终含水率 5%~10%。

根据浸渍前后试样的质量差,计算单板中固体树脂含量,以增重率(WPG)表示。

$$WPG = [(m_2 - m_1)] \times C / m_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 —浸注前单板质量,g; m_2 —浸注后单板质量,g; C —PF 树脂溶液质量分数,%。

1.3.2 压缩处理

利用热压机对浸注处理的单板实施压缩,同时实现单板压缩和树脂固化,通过树脂固化固定压缩变形,最终得到强化单板。

工艺参数:热压温度 180℃,保压时间 5 min。采用不锈钢制厚度规,控制单板压缩厚度;热压板与单板之间采用脱模材料隔开,防止单板与热压板粘连。以压缩前后单板的厚度之差与压缩前单板厚度的百分比为单板压缩率,取 40%、50%、60%和 70%。

1.3.3 胶合板制备

选取压缩率为 50%的强化单板(厚度 1.8 mm),分别使用 PF 胶和 MUF 胶,压制三层胶合板。两种树脂胶的涂布量均为 260~280 g/m²(双面),其中 MUF 树脂中添加树脂质量 15%的面粉。

热压工艺:

1) PF 树脂胶:温度 140℃,时间 5 min,单位压力 1.0 MPa;

2) MUF 树脂胶:温度 120℃,时间和单位压力同 PF 树脂胶。

1.4 性能测试

1) 变形回复率 是表征强化单板压缩变形固定效果的重要指标,其值越小,说明压缩变形固定效果越好^[7]。

参考以往研究^[7-10],可采用湿热处理方法,促进强化单板压缩变形充分回弹。本试验确定变形回复率检测方法如下。

① 试片制作:为了使水分能够充分渗透,在强化单板上截取小试片,沿木材纤维方向为 30 mm,垂直木材纤维方向为 100 mm。

② 湿热处理:试片先经过室温水真空处理 1 h,再相继经过 30℃水中常压浸泡 23 h、60℃水中浸泡 1 h、90℃水中浸泡 1 h 等处理,分别测量 30、60、90℃水处理后试件的厚度;最后在 103℃下干燥至绝干,再测量其厚度。

在每个试片上,沿纤维垂直方向均匀标记 5 个测量点,依据各点厚度测量结果平均值,计算小试片湿态或干态下的变形回复率(%)。

$$\text{变形恢复率} = (T_3 - T_2) / (T_1 - T_2) \times 100 \quad (2)$$

式中： T_1 —压缩前厚度，mm； T_2 —压缩后厚度，mm； T_3 —湿热或干燥处理后厚度，mm。

2) 其他性能 按照 GB/T 17657-1999《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》检测强化单板的密度，按照 JIS Z 2101-2009 “Methods of test for woods”检测强化单板的表面硬度，按照 ASTM D 3500-90(Reapproved 2003)“Standard Test Methods for Structural Panels in Tension”检测强化单板的拉伸强度及模量。

3) 胶合性能 参照 GB/T 17657-2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》I 类胶合强度试验方法，检测强化单板制备胶合板的胶合强度。

2 结果与讨论

2.1 强化单板的变形回复率

表 1 列出经过湿热处理后，不同压缩率及 WPG 强化单板的变形回复率。

表 1 湿热处理条件下强化单板压缩率和 WPG 对其变形回复率的影响

Tab. 1 Compression ratio and WPG with deformation recovery rate of densified veneers after heat-moisture treatment

因子	水平/ %	变形回复率/%			
		30 °C/23 h	60 °C/1 h	90 °C/1 h	103 °C/1 h
压缩率 (WPG 约 14%)	40	18	18	26	13
	50	14	15	22	7
	60	11	12	20	4
	70	12	15	24	9
WPG (压缩率 为 60%)	4.7	19	19	26	11
	9.9	13	14	19	5
	14.5	11	13	19	6
	19.7	2	7	8	2

由表 1 可知，在相同湿热处理条件下，单板的变形回复率随压缩率提高而减小。在 30 °C/23 h 和 60 °C/1 h 湿热处理条件下，压缩率由 40% 增加到 60%、每提高 10% 时，单板的变形回复率呈现 20% 左右的下降。但当压缩率增加到 70% 时，单板的变形回复率不再下降，反而有所增加。

沿垂直于纤维方向压缩木材的变形来自于木材细胞壁 S2 层的压缩变形，以及由此导致细胞腔体积减少的细胞变形，要实现压缩变形永久固定，充胀细胞壁并使其疏水化是一种有效手段^[11-12]。水溶性 PF 树脂预聚物可以进入到木材细胞壁中并使其充胀，并

通过树脂的固化，使变形的微纤丝和基质(matrix，由木质素和部分半纤维素构成)固定，从而实现压缩变形的永久固定^[13]。

随着压缩率的提高，木材中空结构体积减小，单位体积内树脂含量相对提高，树脂固化固定压缩变形的作用亦增强。并且，热压过程中由于热力的耦合作用，促使细胞壁内的树脂向腔壁表面移动，当压缩率达到使细胞壁之间相接触时，即形成胶合界面而固定压缩所造成的细胞变形^[2,14]。如果压缩率太小，细胞壁之间不易形成有效胶合界面，其固定变形的作用较弱；而压缩率过高时，木材变形而导致的内部积聚应力也进一步增大，此时仅凭树脂固化来束缚变形变得困难，所以表现出变形回复率反弹。

表 1 还显示，压缩率为 60% 时，不论何种湿热处理条件，单板的变形回复率均随 WPG 增高而减小；当单板 WPG 近 20% 时，即使在 90 °C 水中处理 1 h，也仅有 8% 的变形回弹，说明树脂量对固定单板变形作用效果显著。

结果还表明，湿热处理温度对单板变形回复率的影响较大，即处理温度越高，单板变形回复率也越高。但 30 °C/23 h 及 60 °C/1 h 处理条件下，单板的变形回复率比较接近。实际操作时，可以根据需要选择 30 °C/23 h 或 60 °C/1 h 的处理条件，来评价单板的变形回弹。

2.2 强化单板的力学性能

强化单板表面硬度测试结果列于表 2。结果显示，各种压缩率和 WPG 条件下，强化单板的表面硬度在 11~17 MPa，而普通单板只有 4 MPa 左右，压缩处理使杨木单板表面硬度提高了 1.5~3.0 倍。

表 2 压缩率和 WPG 对强化单板表面硬度的影响

Tab. 2 Compression ratio and surface hardness of densified veneers

因子	水平/ %	表面硬度/ MPa			
		平均值	最大值	最小值	标准偏差
压缩率 (WPG 约 15%)	40	11.7	18.7	7.2	2.4
	50	12.5	24.7	3.5	3.0
	60	16.6	26.2	7.0	3.2
	70	14.6	24.6	9.1	2.7
WPG (压缩率 约 60%)	5.5	10.9	17.3	3.2	2.8
	9.2	15.9	27.3	6.2	3.4
	14.5	14.6	24.6	9.1	2.7
	19.7	17.3	32.5	12.7	2.6
普通单板		4.3	9.0	2.1	1.4

表 2 结果表明,WPG 约 15%时,随着压缩率从 40%提高到 60%,强化单板的表面硬度逐渐增大。这是因为随着压缩率的提高,单位体积中细胞壁实体物质的量不断增加,抵抗外力作用的能力增强,故单板的表面硬度提高。

但当单板压缩率达到 70%后,其表面硬度不再增加。这是因为此时木材细胞变形极度加大,单位体积中细胞壁实体物质质量的增加达到极限,表面硬度增加也受到限制^[2,11]。另外也与测量位置早晚材差异有关。同一压缩率下,如果测量点位于早材,其表面硬度偏低,而位于晚材的则偏高。

表 2 结果还表明,压缩率为 60%时,强化单板的表面硬度随 WPG 的提高而增大。但当 WPG≥10%时,表面硬度增加趋势变缓;压缩率为 70%时,表面硬度已不再明显改善,且成本增加。因此,后续试验仅对压缩率 40%~60%的强化单板进行性能检测,结果列于表 3。

表 3 强化单板的拉伸强度及模量
Tab. 3 Tensile strength and modulus
of densified veneers

压缩率/ %	WPG/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa
40	10.4	0.927	106.2	18.1
50	12.3	1.019	135.8	25.7
60	6.6	1.175	208.0	28.5

注:强化单板制备工艺:热压温度 180℃,WPG 约 15%。

表 3 结果显示,压缩率由 40%增加到 60%时,强化单板的密度、拉伸强度及模量分别提高 27%、96%和 57%。杨木强化单板的平均密度达到 1.031 g/cm³,比普通杨木单板(0.436 g/cm³)提高近 1.4 倍。单位体积内承载外力作用的物质质量增多,有助于单板的抗拉能力提高。

2.3 胶合板的胶合性能

对强化单板分别采用 PF 胶和 MUF 胶压制胶合板,其胶合强度的检测结果,列于表 4。

表 4 强化单板制备胶合板的胶合强度
Tab. 4 Bonding strength of plywood
made with densified veneers

胶种	胶合强度/MPa			
	平均值	最大值	最小值	标准偏差
PF	1.70	2.20	1.21	0.23
MUF	1.60	2.05	0.93	0.26

不论是 PF 胶还是 MUF 胶压制的胶合板试样,胶合强度平均值均≥1.6 MPa,木材破坏率 100%,远超过 GB/T 9846.3-2004《胶合板 第 3 部分 普通胶合板通用技术条件》I 类胶合强度≥0.7 MPa 的要求。说明经过浸渍树脂、压缩等处理后,杨木单板表面仍保持着良好的胶合性能。

3 结论

1) 在本试验条件下,杨木强化单板的变形回复率随压缩率和 WPG 的提高而降低,表面硬度呈增加趋势。但压缩率达到 70%时,木材变形接近极限,内部积聚应力增高,导致变形回复率增加,表面硬度也不再提高。

2) 本研究开发的杨木强化单板的密度范围为 0.9~1.2 g/cm³,表面硬度 11~17 MPa,抗拉强度和模量分别在 106~208 MPa 和 18~28 GPa 之间,相比普通杨木单板均有较大幅度提高。

3) 利用强化单板制备的胶合板,胶合强度满足 GB/T 9846.3-2004 中 I 类胶合强度的要求,木材破坏率达到 100%。因此,强化单板可以用于集装箱底板以及高铁、动车用车厢地板等特殊用途胶合板的生产,也可以用于对表面硬度要求高的场所。

在实际应用过程中,可根据应用场合和需要,合理选择单板的压缩率和树脂含量(增重率),以控制强化单板的变形回弹,保障其表面硬度和力学强度达到应用要求。

参考文献:

[1] Rowell R M. Chemical modification of wood: A short review [J]. Wood Material Science and Engineering, 2006(1): 29-33.

[2] Navi P, Girardet F. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood [J]. Holzfor-schung, 2000, 54(3): 287-293.

[3] 赵钟声. 木材横纹压缩变形回复率的变化规律与影响机制[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2003.

[4] 黄广华,陈瑞英. 人工林巨尾桉木材压缩密化的研究[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(4): 380-384.

[5] 贺宏奎,李效东,常建民,等. 速生杨密实材主要力学性能的检测 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 155-159.

[6] 龙传文,龙博,韦文榜. PF 树脂对杉木浸渍与压缩工艺的研究 [J]. 中国胶粘剂, 2008, 17(4): 27-29.

(下转第 13 页)

考虑到双螺杆转速越高,消耗能量越多,设备的磨损越大;模头温度需与料筒温度配合,特别是与料筒最后一区,温差过小易导致样品不合格。

综合考虑后,设定优化工艺组合为 $A_3B_2C_1D_3$,验证试验试样的性能测试结果列于表 7。

表 7 优化工艺验证试验结果

Tab. 7 Verified experimental results for optimum technology

指标	MOR/ MPa	MOE/ MPa	拉伸强度/ MPa	抗冲击强度/ (kJ·m ⁻²)	密度/ (g·cm ⁻³)
数值	59.87	3224	25.11	1.08	1.21

从表 7 结果可见,各项力学性能参数指标的数值均相对较高,且密度适中,说明正交试验的优化数据准确可靠。

3 结论

1) 综合考虑壳聚糖增强杉木粉/PVC 复合材料的外观质量、力学性能、设备能耗和磨损等因素,确定优化工艺为:料筒四个区域温度分别为 135、155、178、190℃,双螺杆转速为 25 r/min,模头温度为 180℃,壳聚糖分子量为 860 000。在此工艺条件下制备的复合材料试样密度适中,MOR、MOE、拉伸强度、抗冲击强度均较高。

2) 壳聚糖对木塑复合材料界面增强机理,以及复合材料的吸水性能、热稳定性、耐老化性及流变性等物理性能有待进一步研究;此外,还有待开展利用壳聚糖天然抗菌特性,开发功能性木塑复合材料的研究。

参考文献:

[1] Najafi S K. Use of recycled plastics in wood plastic composites - A review[J]. Waste Management, 2013, 33(9): 1898-1905.

[2] Fang Y Q, Wang Q W, Bai X Y, et al. Thermal and burning properties of wood flour poly (vinyl chloride) composite [J]. Journal of Analysis and Calorimetry, 2012, 109(3): 1577-1585.

[3] Jiang H H, Kamdem D P. Development of poly(vinyl chloride)/wood composites. A literature review[J]. Journal of Vinyl and Additives Technology, 2004, 10(2): 59-69.

[4] 赵爱国,董朝红. 甲壳素/棉纤维混纺梭织家纺面料前处理工艺探讨(1)[J]. 染整技术, 2011(8): 25-27.

[5] 王载利,李达,马建伟. 壳聚糖纤维的应用前景及其生产技术的发展[J]. 现代纺织技术, 2011(2): 52-54.

[6] Shah B L, Matuana L M. Novel coupling agents for PVC/wood-flour composites[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2005, 11(4): 160-165.

[7] 马云海,闫久林,佟金,等. 天然生物材料结构特征及仿生材料的发展趋势[J]. 农机化研究, 2009, 31(8): 6-10.

(责任编辑 劳万里 向琴)

(上接第 8 页)

[7] Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, et al. Surface compression of coniferous wood lumber II: Permanent set of compression wood by low molecular weight phenolic resin and some physical properties of the products[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1991, 37(3): 227-233.

[8] Inoue M, Norimoto M, Tanahashi M, et al. Steam or heat fixation of compressed wood[J]. Wood and Fiber Science, 1993, 25(3): 224-235.

[9] Inoue M, Ogata S, Kawai S, et al. Fixation of compressed wood using melamine-formaldehyde resin[J]. Wood and Fiber Science, 1993, 25(4): 404-410.

[10] 李坚,刘一星,刘君良. 加热、水蒸气处理对木材横纹压缩变形的固定作用[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(4): 4-8.

[11] Norimoto M. Large compressive deformation in wood [J]. Mokuzai Gakkaishi, 1993, 39(8): 867-874.

[12] Inoue M, Ogata S, Nishikawa M, et al. Dimensional stability, mechanical properties, and color changes of a low molecular weight melamine formaldehyde resin impregnated wood [J]. Mokuzai Gakkaishi, 1993, 39(2): 181-189.

[13] 吴玉章,松井宏昭,片冈厚. 酚醛树脂对人工林杉木木材的浸注性及其改善的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 136-140.

[14] Obataya E, Osawa K, Yamauchi H. Mechanical properties of acetylated wood-polystyrene composite fixation of compressive deformation due to inter-cellular adhesion: Fixation of compressive deformation due to inter-cellular adhesion [J]. Mokuzai Gakkaishi, 2011, 57(1): 1-7. (责任编辑 向琴)

欢迎订阅 2016 年《木材工业》杂志,邮发代号 2-311
在线投稿、投放广告,请登录: mcgy. criwi. org. cn