

日式剪力墙覆面板钉连接性能试验研究

武国芳, 龚迎春, 王朝晖, 邢新婷, 赵荣军, 任海青

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 剪力墙是日式梁柱式木结构最主要的抗侧力构件, 其抗侧力取决于覆面板钉连接的性能。按照日式剪力墙构造制作剪力墙覆面板钉连接试件, 分别进行单调和往复加载试验, 分析钉连接的破坏模式、荷载-位移曲线及承载力, 并对相关曲线进行拟合分析。研究表明, 加载方式对钉连接测试结果有明显影响; 落叶松胶合板和辐射松/杨木复合胶合板的覆面板钉连接性能均较好, 二者承载力相近。

关键词: 日式木结构; 剪力墙; 钉连接; 低周往复加载试验

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2017) 01-0027-05

Performance of Nail Connections in Japanese-style Shear Walls

WU Guo-fang, GONG Ying-chun, WANG Zhao-hui, XING Xin-ting, ZHAO Rong-jun, REN Hai-qing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Shear wall is the main element to resist lateral force in Japanese-style post-and-beam structures, whose performance is affected by nail connections. Specimens of sheathing nail connections were manufactured based on Japanese-style shear wall and tested in monotonic and cyclic loading in groups. Load-displacement curves and bearing capacity were recorded during failure. The load-displacement curves and skeleton curves of the hysteresis curves were then fitted by an exponential function using the least square method. We found that performance of the nail connections with Larch plywood and Radiata pine/Poplar combination plywood all worked very well with similar bearing capacity, but was influenced by loading conditions.

Key words: Japanese-style timber structure; shear wall; nail connection; cyclic loading test

作为一个地震多发及台风经常袭击的国家, 日本广泛应用木结构建筑, 其每年新建木结构住宅占新建住宅总量的比例约 45%, 且三层以下的住宅基本全为木结构^[1]。日本传统木结构民居结构主要为梁柱式, 在 19 世纪末引入西方木结构技术, 逐步在木结构中使用斜撑和金属加强件, 加工精度亦大幅提

高, 形成现代木结构体系^[2], 即轴组式(梁柱式)和壁式(板壁式), 且以前者更为流行^[3]。

日本轴组式木结构除了采用斜撑抵抗侧向荷载外, 主要采用耐力壁(剪力墙)来抵抗侧向荷载。日式剪力墙有多种做法, 最常见且抗剪性能较好的为胶合板覆面式剪力墙, 与北美轻型木结构剪力墙构造相似, 区别在于: 1) 覆面板一般采用结构胶合板, 且受日本榻榻米文化影响, 覆面板尺寸一般为 910 mm×1 820 mm; 2) 骨架截面尺寸较大, 边柱通常为 105 mm 方型柱, 间柱尺寸通常为 105 mm×45 mm; 3) 骨架之间采用榫卯连接与钉连接结合的形

收稿日期: 2016-09-22; 修改日期: 2016-11-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“节能型木骨架组合墙体材料的研发”(2014BAL03B02-04)。

作者简介: 武国芳(1986—), 男, 中国林科院木材工业研究所助理研究员, 博士。

式连接,而轻型木结构一般只采用钉连接。

覆面板钉连接的性能是影响剪力墙抗侧性能的主要因素^[4]。我国学者研究了钉种类、钉直径、钉布置形式、覆面板厚度以及环境影响等多种因素,对钉连接单向加载性能的影响^[5-10];还通过低周往复加载试验,研究了钉边距、覆面板厚、受力方向等因素对SPF规格材和OSB板之间钉连接受力性能的影响^[11-12]。地震时钉连接处于往复受力状态,其性能对剪力墙乃至整体结构的性能有重要的影响。

鉴于此,笔者选取胶合板覆面式剪力墙中的覆面板钉连接为研究对象,通过低周往复加载试验,分析胶合板覆面板钉连接的性能,提供剪力墙受力性能分析的基础数据,吸收其优点,为发展我国木结构提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 试材

① 落叶松 (*Larix gmelinii*) 锯材,产自内蒙古根河市,规格为60 mm×160 mm×6 000 mm,平均含水率为11.2%,平均密度为0.546 g/cm³,平均抗弯弹性模量为12.4 GPa,作为骨架用材。

② 混合树种胶合板,购自安徽,由两层辐射松 (*Pinus radiata*) 单板及5层杨木 (*Populus simonii*) 单板组成,采用间苯二酚改性酚醛树脂 (PRF) 胶合,实际厚度约11.5 mm,幅面尺寸为910 mm×1 820 mm,用作剪力墙覆面板;

③ 落叶松 (*Larix gmelinii*) 胶合板,购自黑龙江大兴安岭地区,7层,亦采用PRF胶合,实际厚度约12.5 mm,幅面尺寸为1 220 mm×2 440 mm,用作剪力墙覆面板。

2) 钉 SATO Chemical 生产的CN50(日本标准)圆钉,长50 mm,直径2.89 mm。

按照GB 50206-2012《木结构施工质量验收规范》,采用3点弯曲方法,测得6个钉的抗弯屈服强度平均值为716 MPa,变异系数为0.08。

1.2 试验设计

1.2.1 试件设计

根据日式剪力墙的构造特点及受力特点,设计了三种构型的覆面板钉连接试件,其中构型A代表

边框处荷载垂直于木纹方向的钉连接;构型B代表边框及内部骨架处荷载平行于木纹方向钉连接;构型C代表间柱处荷载垂直于木纹方向钉连接。试件结构及尺寸如图1所示。

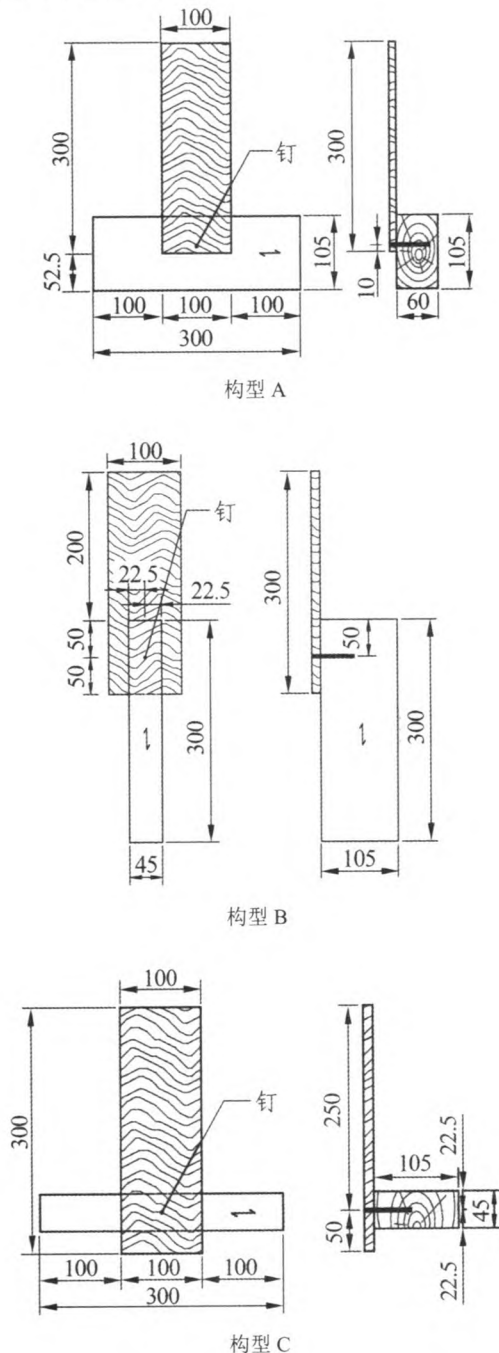


图1 日式剪力墙钉连接试验试件

Fig.1 Sketch of specimens for Japanese-style sheathing nail connection

1.2.2 试验装置

加载设备为美国Instron 5582万能力学试验机,并设计了专用夹具,如图2所示。

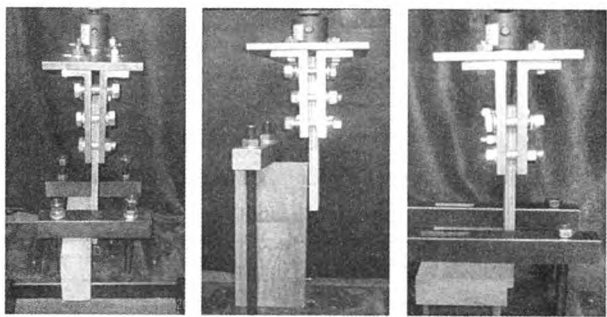


图 2 试验装置
Fig.2 Testing devices

1.2.3 试验设计

共进行单调和往复加载两类试验。

1) 单调加载 按照 ASTM D1761-2012 “Standard test methods for mechanical fasteners in wood”进行, 加载速度为 3 mm/min, 单调加载直至荷载减小到最大荷载的 80% 为止。试验机自动采集加载过程的荷载和位移数据, 采样频率为 10 Hz。

2) 往复加载 参考 ISO 16670-2003 “Timber structures-Joints made with mechanical fasteners -Quasi-static reversed-cyclic test method”。通过预试验, 确定加载速度为 20 mm/min, 钉连接约在 20 min 内破坏, 参考位移取 15 mm。

试件分组及试验参数列于表 1, 共 72 组。分析试件的破坏形式, 并获得荷载-位移曲线, 统计其承载力; 在此基础上, 应用数学函数对数据进行拟合。

表 1 钉连接试件分组及参数
Tab.1 Test groups and configuration of nail connections

试件 分组	荷载与木纹方 向	钉端距/ mm	加载 方式	覆面板 类型	试件 数量
A1	垂直	10	单调	落叶松 胶合板	6
B1	平行	50			6
C1	垂直	50			6
A2	垂直	10	单调	混合树种 胶合板	6
B2	平行	50			6
C2	垂直	50			6
A3	垂直	10	往复	落叶松 胶合板	6
B3	平行	50			6
C3	垂直	50			6
A4	垂直	10	往复	混合树种 胶合板	6
B4	平行	50			6
C4	垂直	50			6

2 结果与分析

2.1 试件破坏形式

在单调荷载作用下, 覆面板钉连接的主要破坏模式为钉拔出(图 3a)及覆面板撕裂(图 3b), 其中钉拔出多发生在钉边距较大时, 而覆面板撕裂仅发生在钉边距较小时。拆解发生钉拔出破坏的试件发现, 钉在木构件上挤压出较长的槽(图 3c)。

在往复荷载作用下, 也可见钉拔出及覆面板剪坏现象, 而区别于单调加载, 其主要破坏模式为钉疲劳断裂(图 3d)。

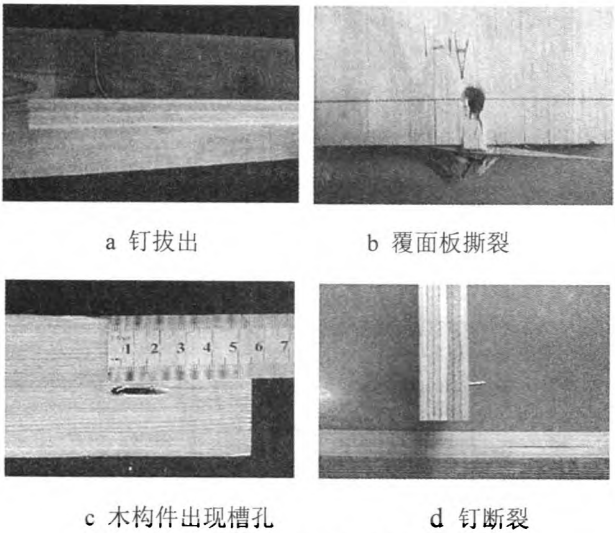


图 3 钉连接破坏模式

Fig.3 Failure modes for nail connections

2.2 荷载-位移曲线

在单调荷载作用下, 各组钉连接的荷载-位移曲线特征一致, 加载初期接近直线, 之后斜率逐渐减小, 达到最大荷载后荷载逐渐下降。图 4a、b 为 2 组钉连接在单调荷载作用下的荷载-位移曲线, 由曲线分布可以看出, 钉连接的变异性较大。

在往复荷载作用下, 各组钉连接的滞回曲线形状类似。由于安装误差及钉连接在一个方向对木构件和覆面板造成的变形, 也会对另一侧的承载性能产生影响, 因此正向和负向的曲线并不完全对称。

如图 4c、d 所示, 钉连接的滞回曲线为反 S 型, 说明单个钉的耗能能力相对较差; 在位移相同的三个循环中, 第二循环开始出现明显的强度和刚度退化, 而第二和第三循环非常接近, 说明钉的变形已经相对稳定。达到最大荷载后, 钉连接的承载力急剧下降, 有的钉由于往复弯曲, 发生了疲劳破坏。

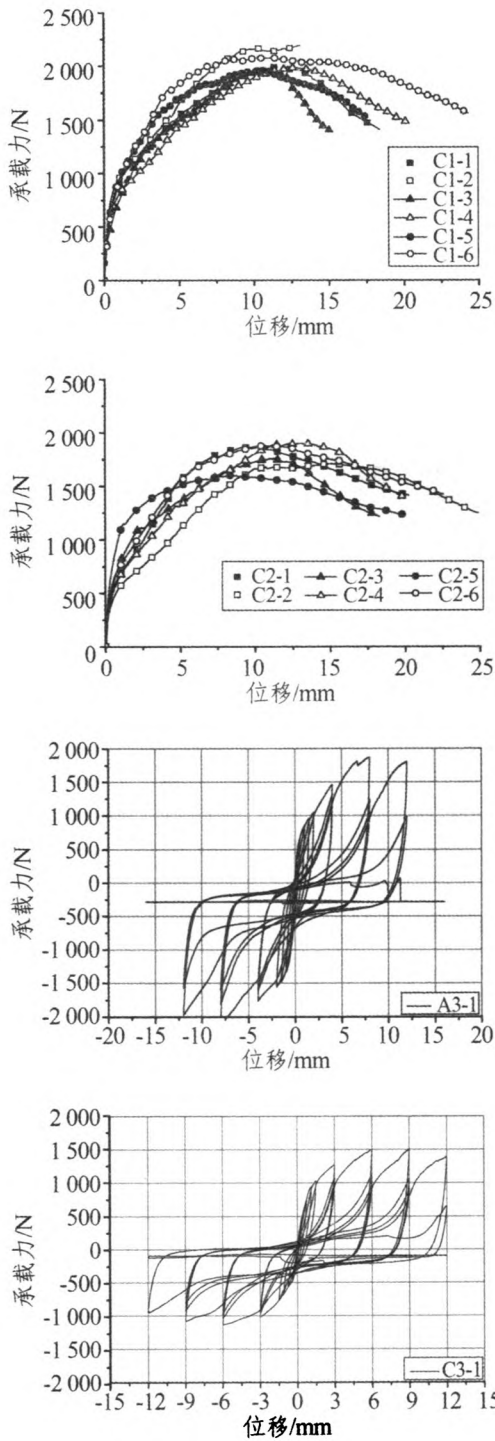


图4 钉连接荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves for nail connections

另外,比较A3组和C3组试件,其区别在于钉边距分别为10、50 mm,而两者的滞回曲线并无明显差异,说明10 mm的边距对于CN50钉是充足的。并且,荷载垂直于木纹时,节点的变形能力较平行木纹方向变形能力强,且滞回曲线较为饱满,说明其耗能能力也较强,与已有研究结论^[13]一致。

2.3 承载力

单调加载试验钉连接的承载力统计结果,列于表2。

表2 单调加载钉连接承载力

Tab.2 Bearing capacity of nail connections under monotonic loading

试件组别	平均值/N	标准差/N	变异性
A1	1 514.65	460.45	0.30
A2	1 574.58	283.72	0.18
B1	1 358.61	210.37	0.15
B2	1 603.08	251.16	0.16
C1	2 022.27	95.06	0.05
C2	1 790.98	117.57	0.07

由表2结果可知,钉连接承载力的变异性较大,最高变异系数达到0.30,可能与木材本身的变异性有关。

通过对比发现,采用落叶松胶合板和混合树种胶合板为覆面板,钉连接的承载力差异不明显,说明两种覆面板的性能接近;钉连接承载力与木纹方向也没有明显相关关系。

本研究测试结果与以往研究结果^[13]相近,而本试验钉直径仅2.89 mm,由钉连接承载力与钉直径的正相关性推测,在相同钉直径条件下,由于落叶松的密度比SPF高,且胶合板的弹性模量和强度亦高于OSB,本研究的钉连接承载力将高于以往研究^[13]。

表3列出各组钉连接正向和负向的承载力的平均值标准差和变异性。

表3 往复加载钉连接承载力

Tab.3 Bearing capacity of nail connections under cyclic loading

试件组别	承载力方向	平均值/N	标准差/N	变异性
A3	正向	1 862.1	565.3	0.30
	负向	1 936.5	413.1	0.21
A4	正向	1 636.4	306.9	0.19
	负向	1 966.0	529.2	0.27
B3	正向	1 470.7	300.4	0.20
	负向	1 988.7	556.0	0.28
B4	正向	2 052.6	281.8	0.14
	负向	1 876.3	138.0	0.07
C3	正向	1 608.5	148.0	0.09
	负向	1 458.2	310.1	0.21
C4	正向	1 571.8	198.2	0.13
	负向	1 661.1	285.7	0.17

与单调加载类似, 2种胶合板钉连接的承载力差异不明显, 且在不同纹理方向的承载力并无统一规律。由于胶合板的组坯方式决定了其强度高于 OSB, 边距为 10 mm 时基本不会出现面板撕裂, 超过 10 mm 时对钉连接的承载力影响亦较小。

2.4 曲线拟合

作为对剪力墙进行有限元分析的基础, 选用带有下降段的指数函数, 拟合钉连接的荷载-位移曲线。

$$F(x) = p_1 x e^{p_2 x} \quad (1)$$

其中: p_1 和 p_2 为待拟合参数; x 为钉连接滑移; F 为钉连接荷载。

通过分析得到滞回曲线的包络线, 也称骨架曲线。由于钉连接在两个方向均有变形, 因此骨架曲线分为正向和负向两段, 并不重合。本文将负向骨架曲线的数据取绝对值, 与正向骨架曲线一并分析。

建立剪力墙有限元模型时, 钉连接数据有两种处理方式: 1) 针对不同位置的钉, 分别采用对应位置的实测数据进行拟合; 2) 不区分钉的位置, 采用全部钉连接的试验数据拟合。

应用此两种方法, 通过最小二乘法对各组钉的试验数据进行拟合, 并且将同种覆面板不同构型的钉连接数据全部进行拟合, 得到各组曲线的拟合参数见表 4。

表 4 钉连接试验曲线拟合参数

Tab.4 Fitted parameters of test curves for nail connections

试验分组	p_1	p_2	试验分组	p_1	p_2
A1	413.07	-0.10	A3	886.25	-0.17
A2	550.84	-0.13	A4	990.24	-0.20
B1	294.50	-0.08	B3	759.31	-0.16
B2	283.75	-0.06	B4	944.54	-0.16
C1	578.35	-0.11	C3	1130.41	-0.26
C2	459.17	-0.09	C4	1031.62	-0.20
L-M	367.45	-0.89	L-C	896.56	-0.19
RP-M	353.6	-0.08	RP-C	932.44	-0.19

注: L-M 为落叶松胶合板覆面板钉连接单调加载时各个方向全部数据 (A1, B1 和 C1) 的拟合结果, L-C 为对应的往复加载数据拟合结果; RP-M 为混合树种胶合板钉连接单调加载时各个方向全部数据 (A2, B2 和 C2) 的拟合结果; RP-C 为对应往复加载数据的拟合结果。

以落叶松胶合板钉连接试件为例, 将其单调加载 A1 组及往复加载 L-C 组试件的试验曲线与拟合曲线对比, 如图 5a、5b 所示。

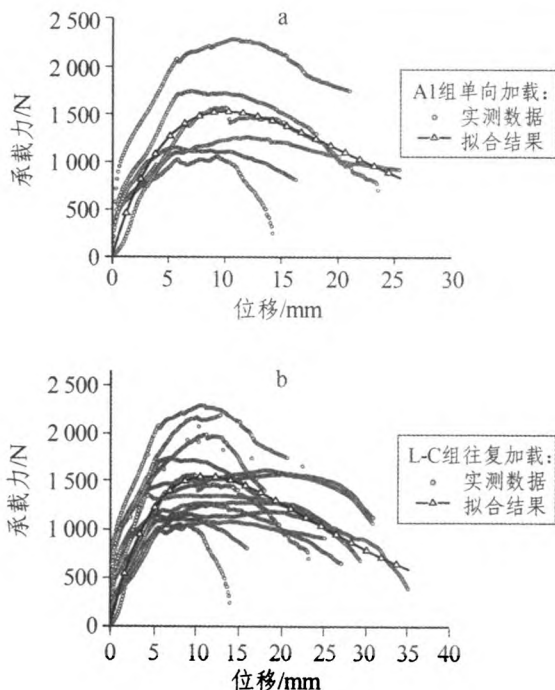


图 5 落叶松胶合板钉连接拟合曲线与试验曲线对比

Fig.5 Comparison of fitted curves and test curves of Larch plywood specimens

由图 5 可知, 拟合曲线可以很好地描述分析试验曲线。进一步对比拟合数据还发现, L-C 组和 RP-C 组的数据比较接近, L-M 组和 RP-M 组的数据也比较接近, 说明两种覆面板钉连接的性能类似。差异体现在同种钉连接的单调加载和往复加载数据, 可能是往复加载的加载速度较大, 且对木材和覆面板多次挤压, 因而往复加载时钉连接的承载力与单调加载的不同。

3 结论

1) 本研究所选用的 2 种胶合板作为覆面板, 其钉连接的性能接近, 可以互为替代使用。

2) 同种钉连接在往复荷载作用下的承载力, 高于在单调荷载作用下的承载力。

3) 采用东北落叶松为骨架, 以落叶松胶合板或辐射松/杨木混合胶合板为覆面板, 钉连接的性能优于 SPF 规格材与 OSB 覆面板的钉连接结构。

参考文献:

- [1] 谢力生. 日本木结构的发展历程与现状[J]. 木材工业, 2009, 23(3): 20-23.

(下转第 49 页)

其主要原因是1.2 mm厚未疏解单板的吸水率为71%,4、6和8 mm厚疏解单板的吸水率分别为120%、128%和120%,单板定向分离疏解完成后,其比表面积增大,树脂也越易于进入到单板内部形成增强型结合,因而耐水性能得到明显改善。综合相关指标考虑,6 mm厚疏解单板压制的重组木的耐水性能性能较优。

2.4 单板厚度对重组木纹理的影响

不同厚度疏解单板压制重组木的纹理,如图4所示。

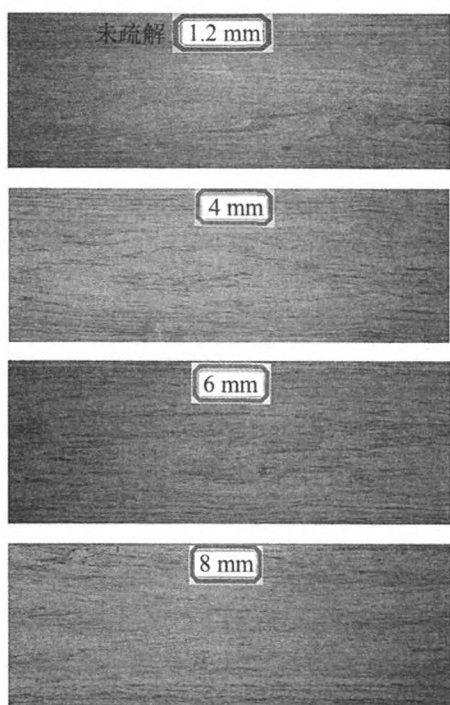


图4 不同厚度疏解单板压制重组木的纹理

Fig.4 Textures of scrimber samples made of crushed veneers with different thickness

从外观看,不同厚度疏解单板压制重组木的纹理略显不同,但均保留有实木的节子和自然材色,呈现出较强的实木感。

3 结论

1) 随着疏解单板厚度的增加,杨木重组木的抗弯性能和抗剪性能均下降,但对抗弯强度整体影响不明显。

2) 疏解单板压制重组木的耐水性能,优于未疏解单板制备的重组木。随着疏解单板厚度的增加,重组木的吸水厚度膨胀率呈先下降后略升的趋势,吸水宽度膨胀率和吸水率呈逐渐下降的趋势。以6 mm厚疏解单板压制的重组木的耐水性能较优。

2) 不同厚度疏解单板压制的重组木纹理略显不同,均呈现出较强的实木感。

3) 企业可根据重组木产品的用途定位,选择疏解单板的厚度,以突出重组木产品的力学性能或耐水性能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张亚梅,李长贵,余养伦,等.中等密度木材制备高性能重组木的适应性[J].木材工业,2016,30(4):36-38.
- [3] 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.
- [4] 张亚慧,张亚梅,任丁华,等.制造工艺对高性能重组木性能的影响[J].木材工业,2016,30(5):31-34.
- [5] 陈凤义,张亚慧,于文吉.家具用桉树高性能重组木的制备及性能检测[J].木材工业,2016,30(6):39-42.

(责任编辑 向琴)

(上接第31页)

- [2] 高颖,杨越,伊松林,等.日本预制装配式框板胶合木结构的技术特点及研究现状[J].木材工业,2013,27(4):20-24.
- [3] 林晨.日本木结构独立住宅的建造及其人性化特点[J].华中建筑,2012(5):29-33.
- [4] Collins M, Kasal B, Paevere P, et al. Three-dimensional model of light frame wood buildings. I: Model description [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(4): 676-683.
- [5] 程海江.轻型木结构房屋抗震性能研究[D].上海:同济大学,2007.
- [6] 陈志勇.轻型木结构中剪力墙钉连接承载性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [7] 周楠楠.强震区轻型木结构抗震性能研究[D].上海:同济大学,2010.
- [8] 邹晓静,郭云,刘雁.轻型木结构中钉节点试验研究[J].建筑结构,

2010(3):111-114.

- [9] 周红梅.木结构钉连接力学性能试验研究[D].长沙:中南林业科技大学,2015.
- [10] 阙泽利,李哲瑞,王菲彬,等.高盐环境对钉连接木结构抗剪性能的影响[J].工业建筑,2015(9):81-85.
- [11] 熊海贝,化明星,康加华,等.轻型木结构钉节点低周反复试验研究[J].结构工程师,2011,27(z1):195-200.
- [12] 熊海贝,化明星,杨春梅,等.低周反复荷载作用下钉节点性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2012,38(4):1-5.
- [13] 熊海贝,潘志付,康加华,等.轻型木结构面板钉节点单调加载试验研究[J].结构工程师,2011,27(6):106-112.

(责任编辑 向琴)