

正交胶合木滚动剪切性能测试方法及影响因子研究进展

蔡诗晨,宋 焕,梁星宇,王志强*

(南京林业大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210037)

摘 要:介绍正交胶合木滚动剪切性能测试方法,分析和比较不同标准中测试方法的优缺点,并总结 CLT 滚动剪切性能影响因素及其研究进展,以期能为国内 CLT 材料研究提供参考。结果表明,测试方法尚未统一,不同测试方法、材料种类、锯材宏观构造特征、CLT 加工工艺和产品几何构造对滚动剪切性能影响较大。建议针对目前概括的主要因素进行深入研究,建立统一的测试标准,同时应基于国产木材、结构复合板材和国内木结构行业实际情况展开 CLT 研究和应用。

关键词:正交胶合木;滚动剪切性能;测试方法;影响因素

中图分类号:S781.29 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)03-0259-06

Research Progress on Rolling Shear Property Test Methods and Influence Factors of Cross-laminated Timber

CAI Shi-chen, SONG Huan, LIANG Xing-yu, WANG Zhi-qiang*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: This paper mainly introduced the rolling shear property test method of cross-laminated timber (CLT), analyzed and compared the advantages and disadvantages of the test methods in different standards, and summarized the influencing factors and research progress of CLT rolling shear properties to provide reference for domestic CLT material research. From the research results at home and abroad, the test methods had not been unified. Different test methods, material types, macrostructure characteristics of sawn timber, CLT processing technology and product geometry had great influence on rolling shear properties. It was recommended to conduct in-depth research on the main factors currently summarized, to establish a unified test standard, and to develop CLT research and application based on the actual situation of domestic wood, structural composite board and domestic wood structure industry.

Key words: cross-laminated timber; rolling shear property; test method; influencing factor

正交胶合木(cross-laminated timber, CLT)是目前国际上最新发展的一种工程木产品,它是由 3 层以上实木锯材或结构复合板材正交组坯,采用结构胶黏剂压制而成^[1]。与其他工程木产品相比,CLT 具有更好的尺寸稳定性、刚度、强度等力学特性和防火性能,主要用于木结构建筑中的楼面板、屋面板和墙体板等承重构件^[1]。目前,世界上已建成的中高层木结构建筑,如加拿大温哥华 UBC 大学的 18 层木结构建筑等,大都采用了 CLT 作为承重

的楼面板或墙体板^[2]。可以说,CLT 的出现,为现代木结构建筑向中高层发展提供了材料选择和发展契机。

在产品构造上,CLT 与胶合木的不同之处在于 CLT 层板的正交性,这种正交性一方面使 CLT 具有优异的尺寸稳定性和面内双向力学性能等;另一方面,也使 CLT 在作为楼面板等构件受到面外荷载发生破坏时,横向层层板的滚动剪切(rolling shear)破坏成为关键、主要的破坏模式^[3]。滚动剪切通常

收稿日期:2018-07-08 修回日期:2018-08-31

基金项目:国家自然科学基金项目(31570559)。

作者简介:蔡诗晨,女,硕士,研究方向:木结构建筑。E-mail:1214346886@qq.com

* 通信作者:王志强,男,教授,研究方向:新型工程木产品和木结构建筑。E-mail:wangzhiqiang@njfu.edu.cn

是指锯材在其横切面产生剪切应变的行为^[4]。由于木材同一年轮中早、晚材抵抗剪切变形的能力有较大差异,也存在木射线和髓心等薄弱的宏观构造,导致在剪力作用下,锯材很容易在早晚材过渡区域、木射线、髓心等部位产生裂缝,发生滚动剪切破坏^[1]。木材滚动剪切强度和模量都较低,对于北美常见的生产 CLT 的树种,如云杉-松木-冷杉(spruce-pine-fir, SPF)等,其滚动剪切模量设计值仅取 50 MPa^[1]。木结构建筑中木构件的力学性能是关系整体建筑安全性和寿命的重要指标^[5]。因此,滚动剪切性能在 CLT 产品设计中十分重要,国外 CLT 手册明确指出 CLT 的滚动剪切刚度和强度是 CLT 楼面板和屋面板设计及性能的关键因素^[4]。

近几年,国内外学者围绕 CLT 滚动剪切性能,进行了两大方面研究,一是 CLT 滚动剪切性能评价方法,目前国际上还没有统一的 CLT 滚动剪切性能测试方法,测试实木锯材或者木质复合材料(CLT)滚动剪切性能的测试方法主要分为 2 大类:压缩剪切(compression shear)和弯曲剪切(bending shear)测试方法;二是 CLT 滚动剪切性能影响因素和性能改善,主要对 CLT 层板材料种类(针叶材、阔叶材、木质复合材料等)、锯材宏观构造特征(年轮宽度、早晚材、年轮走向等)、CLT 加工工艺(组坯方式、连接方式、胶合工艺等)和产品几何构造等方面对 CLT 滚动剪切性能的影响和改善展开了研究。

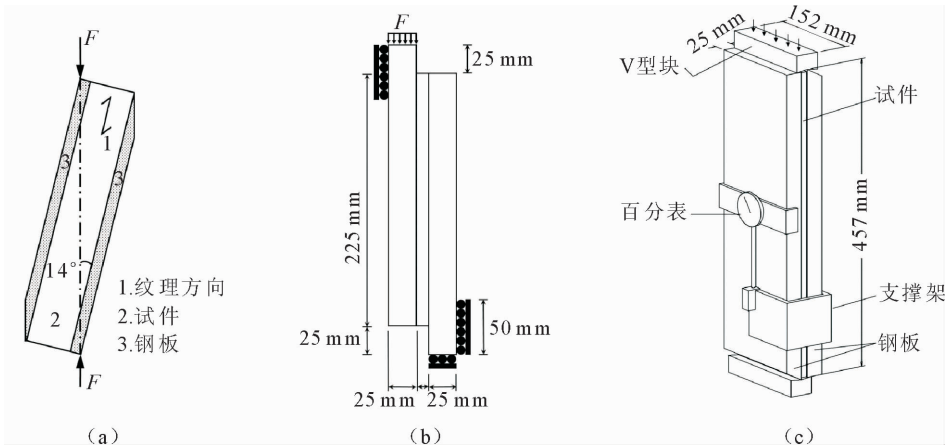
本研究主要对国内外 CLT 滚动剪切性能测试方法及影响因素的研究现状进行分析和总结,介绍最新研究进展,以期能为国内 CLT 滚动剪切性能的研究提供参考。

1 CLT 滚动剪切性能测试方法

1.1 压缩剪切测试方法

代表性的压缩剪切测试方法标准有:EN408、EN789 和 ASTM D2718 等。这 3 种测试方法都是将测试材料置于 2 个钢板之间,当测试材料纹理方向与钢板长度方向平行时,测试材料的面内顺纹剪切性能(planar shear);当材料纹理方向与钢板长度方向垂直时,测试材料的滚动剪切性能。3 种测试方法在材料尺寸、加载角度 α 等方面存在区别,测试装置见图 1。对于材料尺寸,EN408 中明确要求试件长度 300 mm、宽度 32 mm、厚度 55 mm,尺寸变化需在规定的范围内,以满足加载角度要求^[6];EN789 规定试件宽度 ≥ 100 mm^[7],ASTM D2718 则允许尺寸可以不同^[8]。对于另一个重要参数加载角度 α ,不同标准也有区别。在 EN408 中,角度 α 固定为 14° ^[6];EN789 依据试件厚度(6~80 mm)给定角度范围 $8^\circ\sim 25^\circ$ ^[7];而 ASTM D2718 则规定了较小的角度 $3^\circ\sim 5^\circ$ ^[8]。 $3^\circ\sim 14^\circ$ 范围内的不同加载角度的测试方法都有其优缺点,需进一步研究。

这 3 种测试方法都需要将钢板与试件胶合,存在试件准备周期长的缺点,直接采用 3 层 CLT 测试其横向层的滚动剪切性能,即采用纵向布置的实木锯材代替两侧的钢板,荷载从 CLT 试件表层层板(纵向层)传递到横向层层板。如 H. J. Blass^[12]等和 M. Gong^[13]等提出的 3 层夹心结构测试方法(图 2)以及欧洲 CLT 产品标准 EN16351^[10]提出的压缩剪切测试方法。



注:a. 根据 EN408;b. 根据 EN789;c. 根据 ASTM D2718。

图 1 压缩剪切试验测试装置

Fig. 1 Compression shear test device

EN16351^[10]的测试方法要求直接从 5 层 CLT 试件中取出 3 层 CLT 试件,试件宽度 ≥ 100 mm,采

用固定的加载角度 $\alpha=14^\circ$ 进行滚动剪切测试,试验装置和试件锯切方案见图 3、图 4。

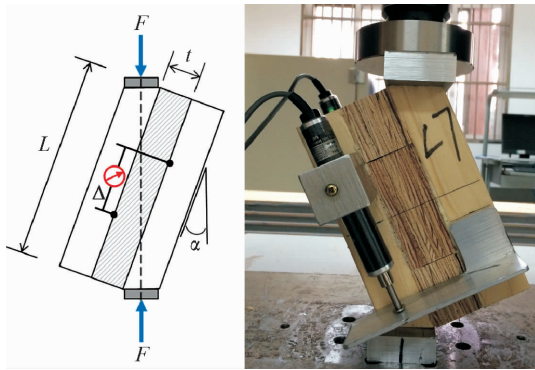


图 2 3 层夹心结构测试装置

Fig. 2 Experimental setup for modified approach using 3-layer sandwich wood specimen

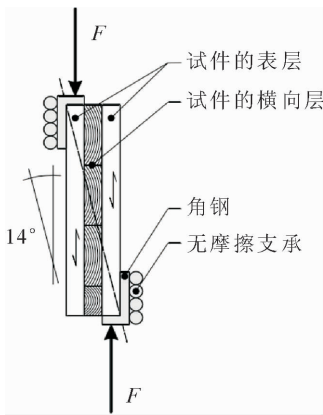


图 3 EN16351 中压缩剪切试验装置

Fig. 3 Equipment setup of the compression shear tests in EN16351

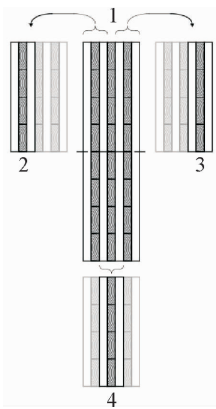


图 4 试件锯切方案

Fig. 4 Cutting scheme for specimens

在压缩剪切测试方法中,材料的(滚动)剪切强度和模量可按 EN 789 中的相应公式计算:

$$f_R = \frac{F_{\max} \cos \alpha}{lb} \quad (1)$$

式中, f_R 为滚动剪切强度 (MPa); F_{\max} 为极限荷载 (N); b 为试件宽度 (mm); l 为试件长度 (mm); α 为

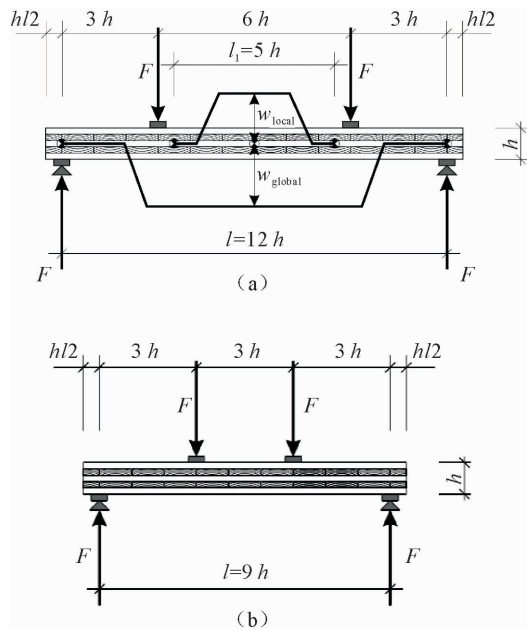
加载角度 ($^\circ$).

$$G_R = \frac{F_2 - F_1}{u_2 - u_1} \cdot \frac{t \cos \alpha}{lb} \quad (2)$$

式中, G_R 为滚动剪切模量 (MPa); t 为试件厚度 (mm); $(F_2 - F_1)$ 为 $0.4 F_{\max}$ 与 $0.1 F_{\max}$ 之间的差值 (N); $(u_2 - u_1)$ 为 F_2 和 F_1 对应的位移差 (mm); b 为试件宽度 (mm).

1.2 弯曲剪切测试方法

弯曲剪切测试法主要包括 ASTM D2718 中的五点弯曲测试方法、EN16351 中的弯曲剪切测试方法以及 ASTM D198^[9] 中的不同跨度三点弯曲测试方法。相比之下, EN16351 更适合测试 CLT 横向层的滚动剪切性能(图 5)。当试件跨高比为 12 时,可同时测试 CLT 横向层滚动剪切强度和模量;当试件跨高比为 9 时,仅用于测试滚动剪切强度^[10]。S. Aicher^[14] 等参考 EN16351,通过弯曲剪切和压缩剪切测试方法确定欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)横向层的滚动剪切性能,提出了具体的计算公式和推导过程。



注:(a)用于测定滚动剪切强度和刚度;(b)仅用于测定滚动剪切强度。

图 5 弯曲剪切试验装置

Fig. 5 Bending shear test device

不同测试方法有不同的优缺点,不同方法测试值有较大差别。在弯曲剪切试验下,试件的破坏模式更接近 CLT 应用的实际情况,但存在二次应力。而压缩剪切试验方法可获得纯剪应力,但力学行为与实际应用有所不同,大多数实际情况下,会出现不同加载模式的叠加^[15]。Q. Zhou^[16] 等分别采用 ASTM D198 的不同跨度三点弯曲法和 ASTM

D2718 的压缩剪切测试法,测试了黑云杉(*Picea mariana*)的滚动剪切性能。其中,压缩剪切法测得的滚动剪切模量为 72.61 MPa,为不同跨度三点弯曲法的试验值的 2 倍多;不同跨度三点弯曲法测得的平均滚动剪切强度为 2.74 MPa,比压缩剪切法高 31%。N. Ayrilmis^[17]等试验表明 ASTM D2718 的五点弯曲测试法比压缩剪切法测得的滚动剪切强度值高 26.3%。M. Li^[18]比较了短跨弯曲测试法和改良后的压缩剪切法,测试的滚动剪切强度相差不大,2 种测试方法对滚动剪切强度的影响不显著。F. Lam^[19]等通过对小试件的扭矩加载试验,测试 CLT 管试件的滚动剪切强度。由于尺寸效应,扭矩加载试验方法得到的剪切强度值与以往的短跨度梁弯曲试验结果不同。因此,如何准确评价 CLT 的滚动剪切性能仍需进一步研究。

2 CLT 滚动剪切性能影响因素

2.1 层板材料种类

可依据 CLT 层板所使用材料的单一性与否,分为普通结构 CLT 和混合结构 CLT(由不同树种锯材组成,或者由锯材和结构复合板组成)。目前,国际上主要使用针叶材,如云杉-松-冷杉组合树种,花旗松等生产针叶材 CLT,但由于针叶材的滚动剪切模量和强度都较低,因此发展利用具有较高滚动剪切性能的阔叶材和结构复合材料生产阔叶材 CLT 和混合结构 CLT 已是 CLT 材料研究的主要方向之一。研究表明,一些阔叶材的滚动剪切性能高于常用针叶材。S. Aicher^[14-21]等系统地研究了欧洲山毛榉用于生产 CLT 的可行性。他们首先根据 EN408 的压缩剪切法测试了山毛榉锯材的滚动剪切性能,结果表明,山毛榉锯材的滚动剪切强度和模量是针叶材的 5 倍和 7 倍,将山毛榉作为 CLT 横向层材料有很大的可行性^[21];其次,该研究团队采用 EN16351 的弯曲剪切和压缩剪切测试方法,研究了以针叶材云杉(*P. abies*)为表层纵向层、阔叶材山毛榉为芯层横向层的混合结构 CLT 的弯曲力学性能,试验结果表明,这种混合结构 CLT 与普通结构 CLT 相比显示出了良好的滚动剪切性能^[14]。M. Gong^[13]等采用三层夹心结构测试方法,测试了阔叶材树种杨木(*Populus tremuloides*)、白桦(*Betula papyrifera*)和黄桦(*B. alleghaniensis*)的滚动剪切性能。试验表明这 3 种阔叶材的滚动剪切性能都优于针叶材黑云杉。T. Ehrhart^[22]等以云杉(*P. abies*)为对照组,测试评价了松树(*Pinus sylvestris*)和桦木(*B. pendula*)、山毛榉、杨木、白蜡木(*Fraxinus excelsior*)等阔叶树种木材的滚动剪切性能,试

验结果也表明了以上阔叶材都有较好的滚动剪切性能。

近年来,我国木材资源供给主体已发生根本性转化,人工速生林木材及人工速生林培育过程中的间伐林成为主要的木材供给类型,如速生杨木由于其资源丰富,价格低廉,往往成为优质原料替代品的考虑对象^[23-24]。因此,国内学者重点研究了国产速生木材的滚动剪切性能,评价了速生木材作为 CLT 材料的可行性。王志强^[25]等系统地评价了速生杨木(*P. tomentosa*)的滚动剪切性能,测试了普通杨木、横纹压缩改性杨木、浸渍改性杨木的滚动剪切模量和强度。研究表明,速生杨木的滚动剪切模量和强度特征值分别为 177 MPa 和 2.24 MPa,都远高于 SPF 规格材的性能,速生杨木可以作为横向层材料应用于 CLT 中。龚迎春^[27-28]等采用国产日本落叶松(*Larix kaempferi*)制备 CLT,探讨 CLT 的生产工艺,研究层板模量、组坯方向和层板层数对 CLT 力学性能的影响。研究发现,将国产日本落叶松搭配其他人工林树种,制备混合结构 CLT,可提高人工林利用率和附加值。Y. Liao^[29]等研究了利用小径级速生桉木(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)生产 CLT 的可行性,采用正交试验研究涂胶量、加压压力和加压时间等 3 个工艺参数对 3 层速生桉木 CLT 试件胶层剪切和弯曲等物理力学性能的影响。试验表明,利用速生桉木制作的 CLT 有很好的结构用途。

国内外学者研究表明,结构复合板材,如层积木片材(LSL)和单板层积材(LVL)等性能优良,与实木锯材复合形成混合结构 CLT,可提高 CLT 的滚动剪切性能和抗弯性能。Z. Wang^[30]等将 SPF 和 LSL 混合组坯形成混合结构 CLT,采用 LSL 作为表层(纵向层)时,混合结构 CLT 的 MOE 和 MOR 分别比普通结构 CLT 增加 19%和 36%;采用 LSL 作为芯层(横向层)时,混合结构 CLT 的 MOE 和 MOR 也相应增加了 13%和 24%。W. G. Davids^[31]等研究也得到了类似的利用 LSL 混合结构能改进 CLT 抗弯性能的研究结论,这主要是由于 LSL 比锯材具有更好的力学性能(滚动剪切性能和抗拉性能)和更均质的力学性能。Z. Wang^[32]等将 SPF 和 LVL 按照不同结构进行混合组坯,形成了 3 种混合结构 CLT,研究表明,由于 LVL 的滚动剪切性能较低,只有将 LVL 置于表层(纵向层)时,才能较大地改善 CLT 的抗弯力学性能。

2.2 锯材宏观构造特征

主要研究了年轮走向、髓心距离等宏观构造特征对锯材滚动剪切性能的影响。关于锯材横切面其

他宏观构造,如早晚材、木射线、年轮宽度等研究较少。Q. Zhou^[34]等采用 3 种不同年轮走向的锯材(弦切板、斜切板、径切板)作为 CLT 横向层,研究了年轮走向对 CLT 横向层滚动剪切性能的影响。结果表明,年轮走向对滚动剪切模量影响较大,而对滚动剪切强度影响较小;当年轮走向为 45°时,锯材可获得最大滚动剪切模量和强度。S. Aicher^[21]等主要测试了不同木材年轮走向和含有髓心锯材试件的滚动剪切性能,发现弦切板的滚动剪切模量最高,髓心试件的剪切强度普遍较低。王转转^[35]采用 EN408 的压缩剪切测试法,研究了速生杨木锯材宏观构造特征对 CLT 滚动剪切性能的影响,发现年轮走向对滚动剪切模量和强度的影响不显著,滚动剪切模量和强度均随髓心距离的增大而增大,但影响不显著,含髓心试件的滚动剪切模量和强度均大幅度降低,髓心对滚动剪切模量和强度均有显著性影响。王志强^[25]等和 Z. Wang^[26]等研究发现,实木锯材的滚动剪切破坏模式与木材横截面宏观构造有直接关系,典型破坏模式有 3 种:早晚材过渡区域发生破坏、沿着木射线方向破坏和髓心处破坏。

2.3 CLT 加工工艺

国内外主要对加压压力、胶黏剂种类和施胶量等生产工艺对 CLT 滚动剪切性能的影响展开了研究。D. Yawalata^[36]等研究了不同加压压力对滚动剪切强度的影响,在压力为 0.4 MPa 和 0.1 MPa 时,压制的 CLT 滚动剪切强度分别为 2.22 MPa 和 1.85 MPa,较高的生产压力可以提升 CLT 的滚动剪切性能。王志强^[37]等以国产速生杨木为试验材料,针对涂胶量、压力和胶黏剂 3 个因素,采取正交试验的手段进行了试验探究,确定了较优的生产工艺条件为涂胶量 180 g · m⁻²,加压压力 1.0 MPa,使用单组份聚氨酯作为胶黏剂。

为防止产品变形和节约胶黏剂成本,目前生产的 CLT 产品横向层层板侧面基本上都没有涂胶胶合,层板之间存在缝隙,研究表明,横向层缝隙平均宽度达到 2 mm。欧洲 CLT 产品标准 EN16351 中允许的最大缝隙宽度为 6 mm^[38-39]。这些缝隙的存在,也会对 CLT 横向层滚动剪切性能存在影响。Z. Wang^[40]等评价了 CLT 横向层层板侧面是否涂胶和横向层层板之间缝隙宽度(0、2、4 mm 和 6 mm)对滚动剪切性能的影响,表明横向层层板侧面是否涂胶和层板之间缝隙宽度对滚动剪切强度有显著影响,而对滚动剪切模量影响不显著,当缝隙宽度 ≥2 mm 时,对滚动剪切强度的影响可以忽略不计。

2.4 产品几何构造

几何构造主要包括 3 个方面:CLT 层板的厚

度、宽厚比以及试件的跨高比。K. S. Sikora^[41]等研究了层板厚度对滚动剪切性能的影响。随层板厚度增加,滚动剪切性能有下降的趋势,平均滚动剪切强度的范围为 1.0~2.0 MPa。M. Li^[18]采用 35 mm 和 20 mm 厚的 CLT 试件,评价厚度对 CLT 滚动剪切强度的影响,发现厚度对 CLT 的滚动剪切强度有显著影响。H. J. Blass^[12]等通过弯曲试验,研究了不同跨高比对滚动剪切模量的影响,表明 3 层 CLT 滚动剪切模量在 40~80 MPa,当其跨高比 ≤20 时对滚动剪切模量影响较大。T. Ehrhart^[22]等测试了恒定厚度为 30 mm 和不同宽度(60、120 mm 和 180 mm)的 CLT 试件,发现宽厚比对滚动剪切强度和模量有显著影响。欧洲 CLT 产品标准 EN16351^[10]对 CLT 层板厚度、宽厚比做了明确的规定:当层板材料为实木锯材时,层板厚度范围为 6~45 mm,宽度范围为 40~300 mm,宽厚比应 ≥4;当层板材料为结构复合板时,结构复合板层板厚度 ≤45 mm,层板的总厚度应小于 CLT 厚度的 1/2。

3 结论

CLT 作为国际上最新发展的工程木,在滚动剪切测试方法和性能影响因素等方面都有待深入研究。如滚动剪切测试方法和滚动剪切强度计算理论都未统一;针、阔叶材滚动剪切性能差异的木材微观构造层面的影响机制有待进一步探究;新型混合结构 CLT 产品也需要创新性发展。

分析不同测试方法的相关性,建立适合 CLT 结构特性的滚动剪切强度计算理论;同时发展新型的 CLT 滚动测试方法,如基于数字图像相关法来评价 CLT 滚动剪切模量。从锯材的重要宏观构造特征,如木射线、早晚材、管孔类型等,以及重要微观构造,如细胞壁厚度、次生壁 S2 层微纤丝角度等方面进一步分析木材滚动剪切性能影响机理。国内发展 CLT 产品,在材料方面可以着眼于资源和产量丰富的速生木材(如速生杨木、桉木等)和结构板材(如单板层积材,结构胶合板等),发展新型混合结构 CLT 产品。

参考文献:

[1] 王志强,罗冬,郑维,等.混合结构对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J].林业工程学报,2017,2(2):145-151.
WANG Z Q,LUO D,ZHENG W,*et al.* Effect of hybrid structure on lateral load resistance of cross-laminated timber shear wall [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2 (2): 145-151. (in Chinese)
[2] 高子震.铁杉正交胶合木设计制造与性能评价[D].南京:南京林业大学,2017.

[3] MESTEK P, KREUZINGER H, WINTER S. Design of cross laminated timber (CLT) [C]. 10th World Conference on Timber Engineering, 2008; 156-163.

[4] AICHER S, DILL-LANGER G. Basic considerations to rolling shear modulus in wooden boards[J]. Otto-Graf-Journal, 2000, 11: 157-165.

[5] 孙燕良, 张厚江, 朱磊, 等. 木构件材料力学性能快速检测研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 245-248.

SUN Y L, ZHANG H J, ZHU L, *et al.* Rapid test on mechanical properties of wood component[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 245-248. (in Chinese)

[6] EN 408. Timber structures-structural timber and glued laminated timber-determination of some physical and mechanical properties[S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2012.

[7] EN 789. Timber structures-test methods-determination of mechanical properties of wood based panels[S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2004.

[8] ASTM D2718. Standard test methods for structural panels in planar shear (rolling shear) [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.

[9] ASTM D198. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

[10] EN 16351. Timber structures-cross laminated timber-requirements[S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2015.

[11] OKABE M, YASUMURA M, KOBAYASHI K, *et al.* Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber[J]. Journal of Wood Science, 2014, 60(1): 49-58.

[12] BLASS H J, FELLMOSE P. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements[C]. Danish; 37th CIB-W18 Meeting, 2004.

[13] GONG M, TU D, LI L. Planar shear properties of hardwood Cross Layer in Hybrid Cross Laminated Timber[C]. Quebec, Canada; 5th International scientific conference on hardwood processing, 2015; 85-90.

[14] AICHER S, HIRSCH M, CHRISTIAN Z. Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers[J]. Construction & Building Materials, 2016, 124: 1007-1018.

[15] ZHOU Q. Development of evaluation methodology for rolling shear in cross laminated timber (CLT) [D]. New Brunswick: The University of New Brunswick, 2013.

[16] ZHOU Q, GONG M, YING H C, *et al.* Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce[J]. Construction & Building Materials, 2014, 64(30): 379-386.

[17] AYRILMIS N, WINANDY J E. Effects of various fire-retardants on plate shear and five-point flexural shear properties of plywood[J]. Forest Products Journal, 2007, 57(4): 44-49.

[18] LI M. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests[J]. Journal of Wood Science, 2017, 63(4): 331-337.

[19] LAM F, LI Y, LI M. Torque loading tests on the rolling shear strength of cross-laminated timber[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62: 407-415.

[20] 付红梅. 正交胶合木平面(滚动)剪切和抗弯性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.

[21] AICHER S, CHRISTIAN Z, HIRSCH M. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations[J]. Holzforschung, 2016, 70(8): 773-781.

[22] EHRHART T, BRANDNER R. Rolling shear: test configurations and properties of some European soft and hardwood species[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 554-572.

[23] 孙静, 吴智慧, 黄秋陆, 等. 层积材家具造型设计初探[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 251-254.

SUN J, WU Z H, HUANG Q L, *et al.* Modeling design of laminated veneer lumber furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 251-254. (in Chinese)

[24] 韩书广, 那斌, 戚佳佳, 等. 速生杨木单板高频加热层积弯曲胶合工艺研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6): 141-144.

HAN S G, NA B, QI J J, *et al.* Bending and gluing techniques with high frequency heating of laminated fast-growing poplar veneer[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6): 141-144. (in Chinese)

[25] 王志强, 付红梅, 罗欢, 等. 速生杨木横向层正交胶合木滚动剪切性能[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2016, 38(5): 116-120.

[26] WANG Z, FU H, CHUI Y H, *et al.* Feasibility of using poplar as cross layer to fabricate cross-laminated timber[C]. World Conference on Timber Engineering, 2014.

[27] 龚迎春, 徐俊华, 武国芳, 等. 国产日本落叶松正交胶合木的层间剪切性能[J]. 木材工业, 2018, 32(2): 6-9.

[28] 龚迎春, 武国芳, 任海青. 国产日本落叶松正交胶合木抗压性能研究[J]. 林产工业, 2018, 45(5): 7-9, 22.

[29] LIAO Y, TU D, ZHOU J, *et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers[J]. Construction & Building Materials, 2017, 132: 508-515.

[30] WANG Z, GONG M, CHUI Y H. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber[J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 622-627.

[31] DAVIDS W G, WILLEY N, LOPEZ-ANIDO R, *et al.* Structural performance of hybrid SPF's-LSL cross-laminated timber panels[J]. Construction & Building Materials, 2017, 149: 156-163.

[31] 王志强, 付红梅, 陈银慧. 锯材/单板层积材混合正交胶合木力学性能研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 121-124.

[32] WANG Z, FU H, GONG M, *et al.* Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL[J]. Construction & Building Materials, 2017, 151: 172-177.

[34] ZHOU Q. Development of evaluation methodology for rolling shear properties in cross laminated timber (CLT) [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2013.

[35] 王转转. 锯材宏观特征对正交胶合木横向层滚动剪切性能影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.

[22] 冯育青,陈月琴,陶隽超. 苏州森林生态服务功能价值评估[J]. 华东森林经理,2009,23(1):37-43.
FENG Y Q, CHEN Y Q, TAO J C. Assessment of service function value for forest ecosystem in Suzhou [J]. East china Forest Management,2009,23(1):37-43. (in Chinese)

[23] 江泽慧. 中国森林资源与可持续发展[M]. 北京:科学出版社,2007.

[24] 张颖. 中国森林生物多样性评价[M]. 北京:中国林业出版社,2002.

[25] 国政,聂华,臧润国. 西南地区天保工程综合效益评价[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):15035-15038.

[26] 马军. 山西省天保区森林生态系统服务功能价值评估[J]. 四川林业科技,2015,36(6):81-84.

[27] 兰洁,孙毓涛,师庆东,等. 新疆天然林生态系统服务功能价值评估[J]. 西北林学院学报,2018,33(4):298-296.
LAN J, SUN Y T, SHI Q D, *et al.* Assessment of service functions value of the natural forest protection program in Xinjiang [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(4):298-296. (in Chinese)

[28] 黄龙生,王兵,牛香,等. 东北和内蒙古重点国有林区天然林保护工程生态效益分析[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1):89-96.
HUANG L S, WANG B, NIU X, *et al.* Evaluation of ecological effects of the natural forest protection program in key state-owned forest districts in northeast China and Inner Mongolia [J]. Science of Soil and Water Conservation,2017,15(1):89-96. (in Chinese)

[29] 毛学刚,焦裕欣,张颖. 基于 BEPS 模型的东北三省森林生态系统 NPP 模拟[J]. 森林工程,2017,33(1):22-27.
MAO X G, JIAO Y X, ZHAN G Y. NPP simulation of forest ecosystem in three provinces of northeast China based on BEPS model[J]. Forest Engineering,2017,33(1):22-27.

(上接第 230 页)

[15] 何友军,李际平,颜立红,等. 基于 RS 和 GIS 的长沙市森林景观结构研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):203-208.
HE Y J, LI J P, YAN L H, *et al.* Study on forest landscape structure of Changsha City based on RS and GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 203-208. (in Chinese)

[16] 赵晓燕. 基于 GIS 的西安市城市景观格局分析及其优化对策[D]. 西安:西北大学,2007.

[17] 李伯祥,陈晓勇. 南昌市景观格局变化与城市扩展分析[J]. 江西科学,2018,36(5):728-736.
LI B X, CHEN X Y. Analysis of landscape pattern change and urban expansion in Nanchang City[J]. Journal of Jiangxi Science,2018,36(5):728-736. (in Chinese)

[18] 韩亚军,贾炜玮,朱万才. 基于 RS 和 GIS 的伊春市土地覆盖变化与空间格局分析[J]. 森林工程,2017,33(5):17-23.
HAN Y J, JIA W W, ZHU W C. Analysis of land cover change and spatial pattern in Yichun city based on RS and GIS [J]. Forest Engineering, 2017,33(5):17-23. (in Chinese)

[19] ZIGMĀRS RENDENIEKS, AIVARS TĒRAUDS, OLGERTS NIKODEMUS, *et al.* Comparison of input data with different spatial resolution in landscape pattern analysis-a case study from northern Latvia[J]. Applied Geography, 2017, 83: 100-106.

(上接第 264 页)

[36] YAWALATA D, LAM F. Development of technology for cross laminated timber building systems[D]. Vancouver: University of British Columbia,2011.

[37] 王志强,付红梅,戴晓汉,等. 不同树种木材复合交错层压胶合木的力学性能[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(12):141-145.

[38] DIAS A M P G, LOPES S M R, VAN DE KUILEN J W G, *et al.* Load-carrying capacity of timber-concrete joints with dowel-type fasteners[J]. Journal of Structural Engineering,2007,133(5):720-727.

[39] 王志强,张浩,俞骏城,等. 正交胶合木墙体热工性能测试与分

析[J]. 新型建筑材料,2016,43(6):69-71.

[40] WANG Z, ZHOU J, DONG W, *et al.* Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests[J]. Maderas. Ciencia Y Tecnología, 2018,20(3):469-478.

[41] SIKORA K S, MCPOLIN D O, HARTE A M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear[J]. Construction & Building Materials, 2016, 116: 141-150.