

结构用集成材在木结构建筑中的应用

徐俊华^{1, 2}, 龚迎春¹, 任海青¹

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 西南林业大学艺术学院, 云南昆明 650224)

摘要: 归纳分析锯材类和复合材料类结构用集成材 (Structural Glued Laminated Timber) 的种类及特点, 论述我国结构用集成材在工艺技术、理化性能、力学性能以及标准修订等四个方面的研究进展, 介绍结构用集成材在国内外建筑工程中的应用。

关键词: 结构用集成材; 木结构; 正交胶合木 CLT; 纤维增强胶合木 FRP; 植筋胶合木

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2017) 03-0005-05

Application of Glulam in Timber Construction

XU Jun-hua^{1, 2}, GONG Ying-chun¹, REN Hai-qing¹

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

2. College of Art, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Varieties and characteristics of glulam made of lumber and composites, which are the two typical raw materials for making glulam, were introduced. Then the literature research of manufacturing technologies, physical, chemical and mechanical properties, as well as standards of the glulam in China, were reviewed. Finally applications of the glulam in timber construction in China and abroad were presented.

Key words: glulam; timber structure; cross laminated timber; fiber reinforced polymer; glued-in-rod glulam

现代木结构建筑具有环境污染小、施工周期短、保温性能好、结构安全性高等优势, 符合节约资源与保护环境的国家技术经济政策的要求, 近年来在我国得到大力推广, 发展前景广阔。结构用集成材是现代木结构建筑的重要材料之一, 主要用于制作建筑结构的承重构件, 其种类丰富、性能优越, 相关标准体系相对完善, 应用潜力巨大。

1 结构用集成材的种类及特点

结构用集成材 (Structural Glued Laminated Timber), 又称胶合木 (Glulam), 是以承重为目的, 将按等级区分的层板 (可指接、斜接或拼宽), 沿纤维方向相互平行、在厚度方向层积胶合而成^[1], 能够剔除木材中的木节以及裂缝等缺陷, 充分利用较短较小的木材, 不仅提高木材的利用率, 而且制作的木结构构件整体刚度良好, 自重较轻, 运输安装方便^[2]。

随着材料的发展和相关研究的深入, 结构用集成材的范畴不断扩大, 材料结构与木构件的创新以及与非木材材料的复合, 使得结构用集成材的性能更加完善, 应用领域更加广泛。

收稿日期: 2016-11-18; 修改日期: 2016-12-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“木材科学与技术重点学科建设专项” (CAFYBB2016ZX002)。

作者简介: 徐俊华 (1984—), 男, 中国林科院木材工业研究所博士研究生, 西南林业大学讲师。

责任作者: 任海青, 女, 中国林科院木材工业研究所研究员, 博士生导师。

1.1 锯材胶合木

由锯材胶合而成, 按锯材之间组坯胶合方式的不同, 目前主要有: 层板胶合木、正交胶合木、胶合空心木柱、楔形胶合木、钻孔胶合木等。

1) 层板胶合木 (Glued Laminated Timber, Glulam) 简称胶合木, 由木纹平行于长度方向的木板层叠胶合而成, 层板厚度在 20~50 mm 之间。一般软质树种层板厚度 < 45 mm, 硬质树种层板厚度 < 40 mm^[3]。

按照集成材各层板的质量等级差异及层板相对中心轴是否对称分布, 分为: 同等组合、异等组合、对称异等组合和非对称异等组合结构用集成材。

2) 正交胶合木 (Cross Laminated Timber, CLT) 也称交叉层积材, 是一种新型工程材料, 由 3 层或以上实木锯材或结构复合板材垂直正交或成一定角度组坯, 采用结构胶黏剂压制而成, 主要用于制作木结构房屋的墙板、屋板、楼板等。

CLT 常见宽度为 0.6、1.2、2.4、3 m, 长度可达 18 m, 厚度可达 508 mm。因正交组坯胶合, 其尺寸稳定性是实木和胶合木横纹方向的 12 倍^[4-7]。

3) 胶合空心木柱 (Glued Hollow Wooden Column) 指顺纹胶合形成的中空型木柱^[8]。木柱横截面外轮廓可以根据需求设计成各种形态, 常见的有四边形、六边形等。这类胶合木柱在保证结构强度的前提下, 可以有效利用缺陷木材, 节省木材资源。

4) 楔形胶合木 (Wedge-shaped Glulam) 将径级 > 8 cm 的原木横截为 0.65 m 长的木段, 再锯成可构成正六边形的两个等腰梯形, 两者相拼接时, 三角形缺口用三角形楔块填充, 以提高出材率。产品长可达 8 m, 宽 0.45 m, 高 0.66 m^[9]。如图 1 所示。

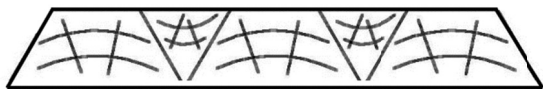


图 1 楔形胶合木

Fig.1 Wedge-shaped glulam

5) 钻孔胶合木 是将小径木锯成方材后, 在横截面中心部位钻出贯通孔, 经干燥后再接长、拼宽形成的胶合木。钻孔可释放应力, 达到减少干燥开裂、翘曲、扭曲缺陷的目的, 并可提高干燥速度。钻孔后板材的弯曲强度略有降低, 但隔热性能提高, 重量减轻^[10]。

1.2 复合材料胶合木

以锯材为基材, 在基材中预埋筋杆, 在基材层板中间或表面铺放增强材料, 以提高胶合木的力学性能。常用的增强材料有直线型, 也有平面型。

1) 纤维增强胶合木 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 是将纤维增强材料作为夹层或面层, 与胶合木叠压胶合而形成的复合材料胶合木, 具有轻质、高强度、高弹性模量等优异物理力学性能, 还具有防冰盐腐蚀、易安装、可操作性强等优点^[11], 常用于结构加固与修复。欧美早在 1985 年开始研究 FRP 桥面板, 并应用于近百座中短跨桥梁中^[12]。

常用增强材料: 玻璃纤维布 (GFRP)、玄武岩纤维增强板 (BFRP)、碳纤维布或板 (CFRP) 等。

2) 植筋胶合木 (Glued-in-rod Glulam) 植筋是一项新技术, 也是目前研究热点, 通过在被连接材料 (胶合木梁、柱等) 中钻孔, 在孔中注入胶黏剂, 再植入筋杆 (玻璃纤维筋、钢筋、螺栓杆等), 使被连接材料紧密连接^[13]。

植筋胶合木具有承载力高、刚度大、防火性能好等优点, 主要用于木结构连接节点, 还可用于大跨度木构件的增强和加固^[14]。北欧国家将植筋胶合木用于木结构建筑及桥梁建造, 已有 40 多年的历史。

3) 金属-木材混合结构胶合木 其表面材料为木材、胶合板、刨花板等木质材料, 芯层材料为钢板、不锈钢板或铝板, 形成金属-木材混合结构胶合木, 稳定性较好, 可防止木材的翘曲、扭曲等变形。

2 我国结构用集成材的研究

结构用集成材主要用于建筑与桥梁领域, 要求其物理力学性能优越、均匀稳定、可设计。我国结构用集成材的研究, 主要围绕工艺技术、理化性能以及标准修订等方面开展。

2.1 工艺技术

1) 层板分等 为了保证结构用集成材的强度设计要求, 必须对其组成单元 (层板) 进行力学性质的分等, 分等的方法有目测和机械两种。

美国的规格材分等研究始于 20 世纪 60 年代, 我国则起步于 21 世纪初。有学者用目测法对杉木规格材进行分级, 发现节子、钝棱、漏刨、腐朽、斜纹理是 5 种常见的降等缺陷, 不同缺陷对锯材性质的

影响有所差异,如钝棱、漏刨并不显著降低规格材强度,但会影响木构件的连接性能^[15]。

机械分等不仅能够提高工作效率,更重要的是能够降低层板力学性质的变异性。结构用集成材的强度等级往往由最外侧层板的强度决定,而最外侧层板通常采用机械法来确定其等级。结构用集成材的生产中,层板分等是关键工序^[16-17]。

2) 层板组坯 层板的组坯方式有同等和异等两类。异等组合层板一般分为最外层、外层、中间层和内层层板,各层层板的树种级别、层板级别都有不同要求。受弯、压弯以及拉弯结构用集成材,宜采用异等组坯方式;轴心受力结构用集成材以及受弯结构用集成材,载荷作用方向多与层板窄边垂直,宜采用同等组坯方式。

3) 胶黏剂选择 胶黏剂的选择要考虑结构用集成材的使用环境,包括气候、温度、湿度、木材种类、是否使用防腐剂以及防腐剂种类、结构用集成材的制造方法等,要具有足够的强度和耐久性,以保证木结构达到预期的使用寿命。

结构用集成材的胶黏剂分为两种:I类胶适用于所有使用环境的结构用集成材的制造,II类胶适用于使用环境温度低于50℃的结构用集成材的生产。

4) 指接工艺 指接材指榫参数、指接压力、胶种、施胶量、节子等,是影响胶合木性能的重要因素。指接材的强度不总是随着齿长的增大而提高,其胶合后的强度主要由同截面内齿顶宽累计量决定^[18];指接压力过大或过小,都会对层板抗弯性能尤其强度造成不利影响,其效应与非指接材相似;不同的胶黏剂对结构用集成材的胶合性能影响较大;只有无节或节子尺寸小于板宽1/10的胶合木,才能用于室外木结构^[19]。

5) 其他工艺 对于纤维增强(FRP)结构用集成材而言,等离子体处理的BFRP与樟子松木材胶合的性能优于未处理材,且较低功率处理效果总体上优于高功率处理效果^[20];对BFRP进行硅烷偶联剂KH550处理,同时进行羟甲基间苯二酚HMR处理,可有效提高剪切强度及木破率,并降低剥离率^[21]。

2.2 理化性能

1) 传湿性能 湿胀干缩以及各向异性是木材区别于其他材料的重要性质。胶合木构件长期暴露于

空气中,受环境湿度的影响,可导致其内部含水率分布不均,产生湿应力。随着水分传递的进行,构件内外含水率差距逐渐缩小,最终达到平衡。经过防腐处理的胶合木,其构件的平衡含水率会降低0.6%~2.1%^[22]。

2) 隔热性能 保温隔热是木结构建筑的重要特点。研究表明^[23],3层正交胶合木墙体的热阻平均实测值为0.84(m²·K)/W,包含6mm宽缝隙的CLT墙体热阻值,比无缝隙CLT墙体热阻值提高23.75%,热阻值随着缝隙宽度和数量的增加而增大。

3) 耐腐蚀性 海边等盐环境会影响胶合木的力学强度,对握钉力和横纹抗剪强度的影响尤为明显。

随着盐浓度的升高,木结构试件的表面握钉力、侧面握钉力均呈下降趋势;在相同浓度的盐分条件下,随着周期的延长,木构件的握钉力性能呈先上升后下降的趋势。盐溶液还会降低胶合木的抗剪强度,横纹粘贴的CFRP对增强胶合木的抗剪强度作用明显^[24]。因此,胶合木结构建筑应避免修建在高盐度地区。

4) 耐久性能 按照ASTM D1037-2012、BS EN 1087-1-1995、CAN/CSA-0188-1975、ASTM D3434-2000四种人工加速老化方法对层板胶合木进行处理,发现层板胶合木胶合剪切强度的下降程度明显高于其他性能指标,可以作为耐老化性能的指标。其中BS EN 1087-1方法用时短,是较优的人工加速老化处理方法^[25]。

5) 耐火性能 木材虽是可燃材料,但是燃烧后在表面形成的碳化层,可阻止燃烧继续。相同条件下,普通木结构的耐火阻燃值是钢结构的1.3倍,是混凝土结构的1.7倍^[26]。

对胶合木结构的耐火性能研究,主要从胶合木构件及连接节点的耐火性能展开。根据GB/T 9978-2008进行耐火试验,发现木结构的墙体、楼板、吊顶以及胶合木梁、柱,均具有良好的耐火性能^[27]。

还有学者研究了胶合木结构螺栓连接的耐火极限,探讨螺栓直径与间距、侧材厚度、载荷水平、连接端距、钢夹板内外边缘等对耐火性能的影响。发现螺栓的直径和间距对耐火极限影响不大,增加侧材厚度、降低荷载水平、增加连接端距,均能提高其耐火极限^[28]。

6) 力学性能 目前关于结构用集成材力学性能的研究,集中在胶合木构件和节点连接两个方面:胶合木植筋抗拔锚固性能;FRP增强胶合木构件的蠕变性能^[29];碳纤维布加固梁柱式胶合木结构的抗侧性能^[30];单调与低周反复载荷作用下梁柱节点的抗震性能;胶合木框架-剪力墙结构的抗侧性能;木构件内嵌钢板螺栓的抗弯及弯剪性能;胶合木网壳半刚性节点抗弯承载性能等。

研究表明,纤维增强的胶合木,其构件的静曲强度、胶合破坏强度、蠕变等性能都有较大改善,连接节点处胶合木裂缝得到抑制,结构抗侧性能和抗震性能得到提升;自攻螺钉增强、内嵌钢板等形式的胶合木螺栓节点,性能更加优越;边距、胶层厚度、长径比是影响植筋胶合木抗拔性能的主要因素,胶合木开裂、植筋杆拔出和植筋杆屈服是破坏的主要模式。

2.3 标准修订

我国关于结构用集成材以及木结构领域的标准制定滞后于国外。近年来,在借鉴美国、加拿大、日本等国家相关标准的基础上,我国已逐渐建立并不断完善适合我国国情的结构用集成材标准体系(表1)。

表1 国内结构用集成材相关标准

Tab. 1 Standards of structural glulam in China

标准类型	标准编号	标准名称
国家标准	GB 50005-2003	木结构设计规范
	GB/T 26899-2011	结构用集成材
	GB/T 50708-2012	胶合木结构技术规范
	GB/T 50329-2012	木结构试验方法标准
	GB/T 28987-2012	结构用规格材特征值的测试方法
	GB/T 28986-2012	结构用木质复合材产品力学性能评价
	GB/T 29895-2013	横向振动法测试木质材料动态弯曲弹性模量方法
	GB/T 29897-2013	轻型木结构用规格材目测分级规则
	GB/T 28993-2012	结构用锯材力学性能测试方法
	GB/T 31264-2014	结构用人造板力学性能试验方法
行业标准	GB/T 28986-2012	结构用木质复合材产品力学性能评定
	LY/T 2381-2014	结构用木质材料基本要求
	LY/T 2382-2014	应力波无损测试锯材动态弹性模量方法
	LY/T 2383-2014	结构用木材强度等级
	LY/T 1975-2011	木材和工程复合木材的持续负载和蠕变影响评定

3 结构用集成材的应用

3.1 国外应用

1900年,瑞士和德国颁发了第一批胶合木专利;1906年,德国的曲线胶合木结构专利标志着胶合木建筑的开端;1934年,美国最早的胶合木结构建筑,位于美国林产品研究所,沿用至今;1942年,胶合木行业引入了可完全防水的苯酚-间苯二酚-甲醛树脂胶黏剂,使胶合木能用于室外环境;20世纪50年代以后,欧美及日本等发达国家和地区逐步形成了较成熟的技术体系,并且将其广泛应用于商业建筑、公共建筑及桥梁等建筑工程领域。典型案例如下:

1981年,美国华盛顿州的塔科玛体育馆,其穹顶为胶合木结构,由许多三角形单元木架构组成。穹顶直径162m,穹顶距离地面45.7m,屋顶共有414个高度为762mm的弧形胶合木梁,是世界上最大的木结构穹顶。

1997年,日本秋田县的大馆树海体育馆,屋面为秋田杉胶合木构件,屋顶体系由双向胶合木杆件和支撑构件组成空间桁架结构。

2008年,加拿大BC省的奥林匹克速滑馆,预制的“木浪”结构板横跨于间距约为12.8m的曲梁之间,该“木浪”结构由普通的2"×4"(38mm×89mm)SPF(云杉-松树-冷杉)规格材构成。

2016年,温哥华UBC学生公寓,充分展示了木结构建筑施工周期短的优势,是全球第一栋超过14层的混合建筑,也是全球最高的木结构建筑,高53m共18层,采用了重木、轻钢和混凝土多种结构形式。建筑的首层是混凝土结构,外加两个混凝土核心筒,其余17层由正交胶合木(CLT)楼板和胶合木梁组合而成。

3.2 国内应用

我国现代木结构建筑始于20世纪50年代。如:1952年兴建的清华大学西大饭厅,采用现代木屋架;1957年,我国第一座胶合木结构房屋在北京建成;1959年,我国最早的胶合木桥梁建成于福建莆田,桥梁跨径44m。

随后的几十年,由于资源匮乏和木材短缺,相关条文与政策对木材在建筑上的应用制定了严格的限制措施,我国的木结构发展几乎停滞,直到20世纪90年代开始才逐渐应用。如:1989年,四川江油

电厂的胶合木双脚拱架结构形式,跨度88 m,长37 m,拱高27 m;1990年,亚运村的康乐宫嬉水乐园,屋顶为12根胶合木大梁支撑的玻璃穹顶,胶合木大梁长30 m、宽0.4 m、高2 m,跨度为60 m。

进入21世纪以来,在倡导低碳绿色建筑的今天,胶合木结构建筑在体育馆、展览馆、宗教建筑、游泳建筑等公共建筑和桥梁工程领域开始应用。典型工程案例如下:

2004年,国家体育总局游泳训练馆修复工程,屋顶采用木拱肋屋架结构替换原混凝土结构,将交错连接的木梁与金属屋面吊顶有机结合,屋顶长71.5 m、宽36 m、高17 m;同年,上海佘山高尔夫球场人行桥采用弧型胶合木结构,桥跨度33 m,宽2.5 m。

2009年,杭州香积寺重建,其胶合木结构建筑面积达6 000 m²。

2011年,广西柳州开元寺复建工程,所有建筑全部采用木结构,其中大雄宝殿是国内第一座将新型材料和传统木构造结合在一体大型佛教殿堂,其主体跨度接近20 m,占地1 520 m²,高26.6 m,目前为世界现代木结构佛教建筑之最。

2012年,贵州百里杜鹃展览馆采用胶合木结构穹顶,其中心跨度53 m,穹顶由6个胶合木叶片组成,建筑面积达3 340 m²。

2014年,苏州胥虹桥采用胶合木结构桁架,拱桥全长120 m,单跨75.7 m,桥宽6 m,下拱截面最大达到340 mm×1 200 mm,拼接主拱的单根曲线构件长达21 m,是目前全球跨度最大的重型木结构桥梁。

4 结语

木结构低碳环保,自2015年起,国务院、发改委、住建部和国家林业局等密集发文,大力倡导木结构建筑。结构用集成材作为木结构建筑的主要材料之一,其种类与内涵在不断扩大与丰富,关于结构用集成材的研究也越来越深入,必将推进我国木结构建筑的蓬勃发展。

参考文献:

- [1] GB/T 26899-2011, 结构用集成材[S].
- [2] 木结构设计手册(3版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] GB/T 50708-2012, 胶合木结构技术规范[S].
- [4] ANSI/APA PRG320-2012, Standard for performance-rated cross-

- laminated timber[S].
- [5] 龚迎春, 任海青. 正交胶合木的特性及发展前景[J]. 世界林业研究, 2016, 29(3): 71-74.
- [6] 阙泽利, 李哲瑞, 姜桂超, 等. 交叉层积材(CLT)的开发应用及发展前景[J]. 木材工业, 2016, 29(6): 22-26.
- [7] I Bejtka. Cross(CLT) and diagonal(DTL) laminated timber as innovative material for beam elements[C]. KIT Scientific Publishing, 2011.
- [8] 陈银慧, 胡谨, 孙友富, 等. 胶合空心木柱结构设计与制造工艺[J]. 林业机械与木工设备, 2014, 42(9): 33-36.
- [9] 铃木傑. 楔形集成材的开发[J]. 木材工业(日本), 1985, 40(5): 239-242.
- [10] 山田範彦, 杉原彦一, 森光正. 间伐小径木打孔集成材的开发[J]. 木材工业(日本), 1987, 42(8): 360-364.
- [11] 方海, 韩娟, 刘伟庆, 等. GFRP-花旗松胶合木夹芯桥面板受弯性能试验与结构设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 58-63.
- [12] Luke S, Canning L, Collins S, et al. Advanced composite bridge decking system-Project ASSET[J]. Structural Engineering International, 2002, 12(2): 76-79.
- [13] 张秀标, 聂玉静, 孙正军, 等. SPF胶合木植筋抗拔性能研究[J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 89-93.
- [14] 朱世骏, 杨会峰, 陆伟东, 等. GFRP筋与胶合木粘接锚固性能试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 142-148.
- [15] 郭伟, 任海青, 殷亚方. 杉木目测分等规格材缺陷类型及分布的研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 462-465.
- [16] Brown L S, DeVisser D A, Tuvey R S, et al. Mechanically graded lumber: the grading agency perspective[J]. Wood Design Focus, 1997, 8(2): 3-7.
- [17] 任海青, 郭伟, 殷亚方. 北美规格材机械分等综述[J]. 世界林业研究, 2006, 19(3): 462-465.
- [18] 周海宾, 孙华林, 张俊珍, 等. 结构用胶合木性能若干影响因素[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 553-558.
- [19] 谢力生, 刘佳权, 乔鹭婷. 节子对落叶松胶合木胶合性能的影响[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 21-24.
- [20] 王希俊, 申士杰, 靳婷婷. 等离子体处理对BFRP增强结构用集成材胶合性能的影响[J]. 林产工业, 2014, 41(6): 28-30.
- [21] 马春梅, 申士杰, 张鹏翼. BFRP增强结构用集成材胶合性能的研究[J]. 木材加工机械, 2013, (1): 27-30.
- [22] 岳孔, 毛旭冉, 周叮, 等. 胶合木构件的传湿性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 97-100.
- [23] 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.
- [24] 阙泽利, 滕启城, 王菲彬, 等. 盐分对CFRP加固胶合木顺纹抗剪强度的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(4): 436-441.
- [25] 罗志华, 蔡鑫荣, 张晶, 等. 胶合木构件胶接性能及耐久性研究[J]. 林产工业, 2015, 42(3): 18-21.
- [26] Gilham. An over view of resistive design of exposed timber structure[J]. World Architecture, 2002(9): 76-77.
- [27] 邱培芳. 木结构建筑防火设计中常见问题探讨[J]. 建筑科技, 2015(3): 42-43.
- [28] 张晋, 许清风, 柏益伟, 等. 胶合木钢夹板螺栓连接节点的抗火性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 58-64.
- [29] 何敏, 陆伟东, 岳孔, 等. FRP增强胶合木拱的蠕变性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 107-110.
- [30] 熊海贝, 刘应扬, 姚亚, 等. 碳纤维布加固梁柱式胶合木结构抗侧性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1463-1469.

(责任编辑 向琴)