

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022093

我国胶合木制备及增强技术研究进展

陈旭¹, 王玉荣^{1,2}, 龚迎春^{1,2}, 任海青^{1,2}, 刘佰龙³

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 南京林业大学林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京 210037;
3. 大兴安岭神州北极木业有限公司, 黑龙江漠河 165100)



摘要: 胶合木是我国梁柱式、井干式木结构建筑的主要材料。介绍我国胶合木应用现状, 分析层板分等、指接工艺和胶合工艺对层板及胶合木力学性能的影响, 阐述各主体制备工艺目前存在的问题及发展趋势。在此基础上, 分析胶合木梁抗弯承载性能和破坏模式, 探讨布状、棒状和板状增强方式对胶合木的增强机制, 总结各种增强方式的作用效果和不足, 为胶合木的进一步研究提出建议。

关键词: 胶合木; 制造工艺; 抗弯性能; 增强技术

中图分类号: TU366.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 06-0024-08

Research Status of Manufacture and Reinforcement Technology of Glued Laminated Timber in China

CHEN Xu¹, WANAG Yu-rong^{1,2}, GONG Ying-chun^{1,2}, REN Hai-qing^{1,2}, LIU Bai-long³

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Co-innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Products, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
3. Daxing'anling Shenzhou Arctic Wood Industry Co., Ltd, Mohe 165100, Heilongjiang, China)

Abstract: Glued laminated timber (GLT) is a main material for beam-column timber structures and log houses in China. In this paper, the current status of GLT industry in China was elaborated. The effects of the key manufacturing process of GLT including the laminate grading, finger-joining process, and gluing process on the mechanical properties of GLT were analyzed. The existing challenges and developing trends of the main manufacturing processes were described. Based on the practical situation, the bending properties and failure modes of GLT were analyzed, and the reinforcement mechanisms of cloth-like, rod-like, and plate-like reinforcement on the GLT were discussed. The benefits and deficiencies of the reinforcement technologies were summarized.

Key words: glued laminated timber (GLT); manufacturing process; bending properties; reinforcement technology

收稿日期: 2022-05-10; 修改日期: 2022-10-25

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目“高强度人工林杉木工程木产品制造关键技术”(2021SY09)。

作者简介: 陈旭 (1998—), 女, 硕士研究生。Email: 3321752038@qq.com

通讯作者: 龚迎春, 男, 助理研究员。Email: gongyingchun@caf.ac.cn

随着木材及加工领域科学技术的发展, 高强度、性能稳定的工程木制品不断面世, 全世界范围内木结构建筑向多高层、大跨度和混合建筑发展。胶合木 (glued laminated timber, GLT) 是将三层或三层以上、厚度不大于 45 mm 的木质层板沿顺纹方向叠层胶合而成的工程木制品。层板分

级和组坯技术的应用,弥补了人工林木材径级小、强度低和材质不均等缺陷,因此GLT具有性能可控、结构可设计、规格可调等特点,是小材大用、劣材优用的有效途径之一^[1]。

我国胶合木生产开始于20世纪80年代,特别到90年代后,国内经济发展和人工速生林政策的推行促进了胶合木行业逐步兴起。经过将近20余年的发展,我国胶合木产业已初具规模。进入21世纪以来,胶合木作为绿色建筑材料开始应用在体育馆、展览馆、宗教建筑、游泳建筑等公共建筑和桥梁工程领域,如成都农博园、北京冬奥会雪橇中心等大型建筑均将GLT用于建筑结构的承重构件。由此可见,GLT在大型公共建筑不断地被广泛应用,满足我国建筑行业绿色发展要求,具有广泛的应用前景。

目前,我国GLT原材料主要依赖进口材。据笔者调研,生产企业主要分布在东北、江苏、上海、山东、湖北等地,生产线105余条,年产能累计达50万~70万m³,年产量在20万~30万m³;圆柱胶合木和弯曲胶合木生产线20余条,多轴加工中心30台(套),基本能够满足国内木结构建筑的胶合木生产需要。为保证胶合木生产质量,国外采用第三方认证制度进行管控,如欧洲的CE认证、美国的APA认证和日本的JAS认证等^[2]。2020年我国正式发布胶合木认证方案,2021年7月6日,中国建研院认证中心为昆仑绿建颁发国内首张CABR胶合木产品质量认证证书^[3],标志着我国胶合木产品认证体系基本形成,进一步推动了木结构行业高质量发展。

胶合木作为现代木结构建筑中的主体建筑材料,其产品质量直接影响建筑结构安全。胶合木由原木到成品,历经分等、指接、胶合等工艺,包括选材、干燥、锯切、刨光、纵接、拼宽、组坯、砂光等若干工序。此外,针对大跨度、异型胶合木等特殊受弯构件需求时,以及采用木材力学强度较低的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)、辐射松(*Pinus radiata*)等原材料制备胶合木时,胶合木材料本身力学强度并不满足结构力学需求,需要通过添加增强材料进一步提升其力学抗弯性能。

胶合木的制备工艺是影响其性能的重要环节。本文通过GLT制备工艺、承载特性和增强方式的系统阐述,分析GLT的研究进展、存在的问题和发展方向,旨在为GLT质量提升和相关研究提供参考。

1 胶合木制备工艺研究进展

GB 50206—2012《木结构工程施工质量验收规范》明确要求胶合木进行指接强度、胶缝完整性及抗弯性能检验,以检验胶合木的指接工艺、胶合工艺以及层板分等是否符合工程质量要求。因此本文将主要从层板分等、指接工艺、胶合工艺的角度进行介绍。

1.1 层板分等

GLT强度等级主要由层板分等分级控制。现行的国内外层板分等方法主要为目测分等和机械分等。目测分等起源于20世纪北美,以目测木材表面缺陷程度划分强度等级。其中节子是限制木材力学强度的最关键的缺陷类型,节子的大小、数量、位置等直接影响木材的拉伸强度^[4]。国外基于以节子为主的各类缺陷对木材强度的影响进行了大量研究,Samson^[5]和Xu^[6]提出了节子对木材强度和刚度折损的理论模型。我国对木材分等的研究起步较晚,早期的分等原则以借鉴国外标准为主。中国林科院木材所任海青等^[7-11]研究人员具体研究了国外目测分等的发展情况,分析了加拿大、美国、英国、澳大利亚标准体系中结构用材的目测分等规则,针对目测分等提出了应在充分掌握木材自身物理特性、缺陷对质量的影响和规格材用途基础上细化目测分等规则,颁布了国家标准GB/T 29897—2013《轻型木结构用规格材目测分级规则》,有效推动了我国木材目测分等的发展。但目测分等在实际应用中主要依靠技术人员目测主观判断,技术要求较高且存在误差风险,因此基于机器视觉技术来判别木材表面缺陷进行目测分等需进一步研究。

机械分等是采用机械分等设备对锯材进行非破坏试验,主要包括弯曲法、应力波法、超声波法、横向振动法和纵向振动法。任海青等^[12-18]以锯材目测分等结果为参照,对杉木和兴安落叶松

(*Larix gmelinii*) 锯材进行了横向振动、纵向基频振动和超声波三种无损检测,发现不同的无损检测方法对等级分布和特征值存在影响,动态弹性模量和静态弹性模量存在显著线性相关;分析了国产杉木和兴安落叶松目测等级规格材抗弯强度、抗拉强度和短轴抗压强度等力学性能,基于强度分布概率函数和非参数统计方法,提出了我国锯材机械分等等级、边界条件、特征值及设计值指标,制定了国家标准 GB/T 36407—2018《机械应力分级锯材》,合理划分了锯材强度等级,有效提高了高等级材产量,推动了国产木材在结构材领域的应用。此外, Kretschmann^[19]提出了以密度作为分等指标进行强度等级划分,但仅以密度单一指标进行划分,木材强度离散性较大,存在安全隐患。目前我国已有锯材目测和机械分等相关标准,但木结构相关企业缺少目测分等技术人员、

缺少机械分等设备,造成了国产木材不能进行有效强度分等,严重降低了木材的利用率和强度设计指标,在我国鼓励发展智能制造、绿色制造的大背景下,亟需研发国产机械分等设备。

1.2 指接工艺

指接工艺是胶合木制备的关键环节,指接端压、指榫类型、指榫长度及嵌合度是控制层板力学性能的关键工艺参数。

1) 端压:为获得合适的端压,堀江秀夫等^[20]对柳杉进行嵌合压缩试验,研究表明端压-位移曲线主要分为单线连续型、双线连续型和双线间歇型;叶琦等^[21]对新西兰辐射松进行指接端压预试验,其端压-位移曲线类型与堀江秀夫研究结论一致(图1),建议端压选择范围在单线连续型曲线第一直线段的中间值和双线间曲线第一直线段的上限值之间。

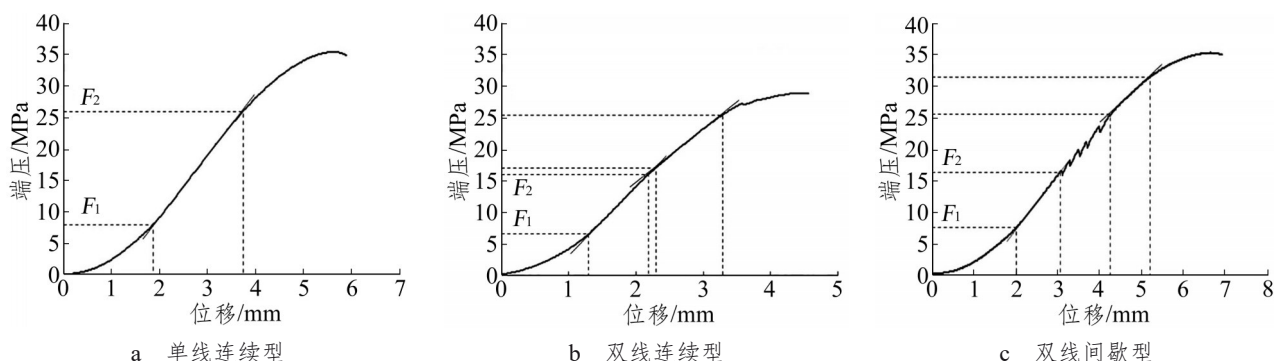


图1 新西兰辐射松指接层板端压-位移曲线^[21]

Fig1 The end-pressure displacement of pinus radiata finger-jointed timber^[21]

2) 指榫类型:按照加工方向可分为水平型(H型)和垂直型(V型),垂直指接强度普遍高于水平指接,但垂直型指肩面积过大趋于端接,胶接面积低于水平型指接,会导致垂直型指接的层板抗弯强度低于水平型指接^[22]。

3) 指榫长度:对指接层板抗弯性能有显著影响,层板抗弯强度随着指榫长度的增加而增大^[23]。研究发现当指榫长度从12.7 mm增加到25 mm,层板抗弯强度增加14%,兴安落叶松抗弯强度平均值和5%分位值达GB/T 26899—2011《结构用集成材》机械分等M_E14等级,但指榫长度从12.7 mm增加到19 mm时,层板抗弯强度有略微下降^[24-25],因此在实际生产中并不是指榫越长越好,在满足

指接强度的前提下应选择较短指榫长度,减少能源消耗。

4) 嵌合度:嵌合度是指顶宽与指底宽之差,是保证齿榫结合时胶合压力作用充分发挥的关键因素。关于嵌合度的研究结论取值集中在0.1 mm左右。有研究结果表明0.1 mm嵌合度显著优于嵌合度为0(无针眼)或0.5 mm^[22]。嵌合度的选取与指长密切相关,研究发现指长14 mm和19 mm最适嵌合度为0.1 mm;指长25 mm和28 mm的最适嵌合度为0.2 mm^[23]。此外,试验发现指接层板抗弯性能破坏模式主要包含下表面拉伸破坏和指接处锯齿状撕裂破坏且伴随有少量的指根断裂,破坏过程中伴有劈裂声^[21]。

目前,指接工艺参数对层板抗弯性能的研究较多,但针对指接工艺参数对层板足尺抗拉强度及破坏机理影响的研究较少,而GLT梁抗弯破坏模式主要是最外层层板受拉破坏,需要进一步针对层板足尺抗拉强度及其增强方式进行研究。

1.3 胶合工艺

胶层剪切强度和浸渍剥离是评判GLT胶合性能的主要指标,研究主要集中在胶黏剂类型、涂胶量、冷压压力等工艺参数对胶合性能影响。

1) 胶黏剂:结构胶黏剂选择主要由GLT产品使用环境,包括气候、温度和湿度,木材树种、含水率和抽提物含量,以及环保性能要求等因素来确定。国内外常用的结构胶黏剂包括间苯二酚-酚醛树脂、单组份聚氨酯、三聚氰胺-脲醛树脂。有研究采用异氰酸酯、酚醛树脂、聚醋酸乙烯酯、双组份聚氨酯4种胶黏剂制备杉木GLT,发现由于胶黏剂在木材表面流动性和渗透性好,胶合强度主要由木材强度决定,而杉木木材密度低、材质疏松,故胶黏剂类型对胶合剪切强度影响不显著^[26-27]。采用异氰酸酯和聚氨酯胶黏剂制备的欧洲云杉GLT,其浸渍剥离率满足GB/T 26899—2011《结构用集成材》的要求,但“LX1-1”型异氰酸酯制备的兴安落叶松GLT浸渍剥离率不合格^[28]。

2) 施胶量:不同类型胶黏剂的施胶量不同,一般情况下间苯二酚-酚醛树脂和三聚氰胺-脲醛树脂施胶量 $>250\text{ g/m}^2$,单组份聚氨酯施胶量 $<200\text{ g/m}^2$ 。研究发现在相同压力水平下,随着间苯二酚-酚醛树脂施胶量从 200 g/m^2 增到 300 g/m^2 ,兴安落叶松GLT胶层剪切强度增加 1.38 MPa ,这是由于施胶量的增加,使胶液充分渗入木材并在压力的作用下形成均匀的胶层,但随着涂胶量大于 300 g/m^2 ,剪切强度呈下降趋势,这是因为继续增大涂胶量只导致多余胶液被挤出,胶层厚度过大,影响剪切强度^[29]。

3) 压力:研究发现在相同施胶量水平下,胶合压力与剪切强度的关系与上述施胶量结果相同,即胶合压力并不是越大越好,当胶合压力增到 1.5 MPa ,胶层剪切强度呈下降趋势,这是由于胶液过多渗入到木材管胞组织导致胶合界面缺胶,强度降低^[29]。

目前,我国GLT以单组份聚氨酯为主,少量的间苯二酚/苯酚-间苯二酚用于出口GLT,并没有根据种树区分使用胶黏剂,对保障产品质量安全存在隐患,特别当采用花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)、落叶松等油脂含量较高的木材作为层板制备GLT,需要搭配相应的助剂或者选用其他胶黏剂来提高胶合性能。其次,有部分工厂仍旧采用人工涂胶,无法保证胶用量和胶层的均匀,胶层胶合质量参差不齐,需要进一步优化胶合工艺,提升胶合木连续化生产水平,保障GLT产品质量安全。

2 胶合木梁增强技术研究

GLT常应用于大型建筑物中,胶合木梁是主要的结构承载构件,梁抗弯破坏失效一般是由抗拉侧最外木材层的拉断破坏和层间剪切破坏,使得抗拉侧内层木材、抗压侧木材力学性能没有充分发挥利用。因此,本文以胶合木梁的抗弯性能为代表,基于抗弯性能的影响因素和破坏模式,分析并总结不同材料的增强机制,为研究提高胶合木强度提供借鉴。

2.1 胶合木梁抗弯性能的影响因素及破坏模式

2.1.1 影响因素 国内外研究GLT抗弯性能的影响因素主要集中在密度、含水率、胶缝开裂以及截面尺寸等。

1) 密度:当将密度作为独立变量,研究发现密度与足尺GLT抗弯强度和弹性模量没有明显的相关性^[30]。

2) 含水率:木材含水率对胶合木抗弯强度影响较为显著,木材含水率过高会导致无法形成有效胶合强度,木材含水率过低会导致木材干缩胶层开裂,都会影响GLT抗弯强度,因此合适的木材含水率为 $10\%\pm 2\%$,并且要依据不同气候条件进行控制,才能保证GLT较优的抗弯强度^[31]。

3) 胶缝开裂:胶缝开裂会导致兴安落叶松GLT抗弯强度和弹性模量降低。胶缝开裂率为2%、4%时GLT相对胶合完好,其抗弯强度分别降低8.81%、13.5%,弹性模量分别降低8%、2.9%^[32-33]。

4) 截面尺寸:有研究发现抗弯强度不受梁截面宽度的影响,可不考虑宽度的尺寸效应^[34],但GLT

抗弯强度随着高度增大而降低,尺寸效应明显,其长度与高度的组合尺寸效应系数为 $-0.275^{[35]}$ 。

2.1.2 破坏模式 GLT抗弯承载的典型破坏模式主要是底层层板的受拉破坏、中间层层板的顺纹剪切破坏、以及裂纹、节子和腐朽等缺陷处破坏^[36],见图2。针对落叶松GLT等幅疲劳试验研究表明,落叶松GLT的疲劳损伤始于受压区,之后随着塑形受压区高度循环次数的增加而逐渐向受拉区扩展,最终的破坏模式均为受拉破坏或顺纹

受剪破坏^[37]。对破坏模式研究发现,在没有材质缺陷和连接缺陷的影响下,GLT抗弯承载破坏以延性破坏为主^[38]。纯弯曲段和受力敏感区的裂缝、胶层和支座等连接缺陷、受拉侧节子等材质缺陷是GLT抗弯承载破坏的主要诱因^[39,30]。指接GLT抗弯承载除了典型的破坏模式,当梁的截面高度增大到500 mm时,破坏会发生在弯剪处的指接部位^[40]。因此,指接位置、加载方式及尺寸大小对GLT抗弯承载力及破坏形式都有显著影响。



图2 GLT抗弯承载的典型破坏模式

Fig.2 Typical failure modes of bearing capacity of glued laminated timber

2.2 胶合木梁增强技术

基于GLT抗弯性能受力特点和破坏模式,国内外学者提出了许多增强改善GLT的方法,通过优化组坯设计和改善层板力学强度等方式,提高GLT承载性能。但这些方式在实际生产中有很大的局限性,并且改善的效果不明显,质量不稳定。随着复合材料在传统木梁加固中的广泛应用,将纤维或钢筋等增强材料加入到胶合木梁的制作中逐渐成为主流,增强材料的不同形状和配置参数对胶合木梁的抗弯承载力、抗弯刚度、弹性模量、延性系数等产生影响,将改变胶合木梁受弯承载机制和破坏模式。

2.2.1 布状材料增强 布状材料以纤维增强材料为主,通常在GLT底层层板受拉区域布置纤维增强布,有研究表明仅在GLT受拉区域的最外侧通长满铺碳纤维布可以有效将梁的抗弯刚度提高60%以上^[41],破坏容易发生在节子、斜纹理等木材固有缺陷处^[42]。但在受压区额外布置1层或2层碳纤维布,相比较仅在受拉区域粘贴碳纤维布,抗

弯承载力反而降低了16.7%和4.5%^[43],由于在受压区布置碳纤维布时,加载后期胶层和碳纤维会受压堆积出现裂缝,木材的塑性受压性能得不到充分发展,进而导致试件破坏。此外,纤维布的粘贴层数和配纤率对胶合木梁抗弯性能存在影响,当配纤率分别为0.8%、1.2%、1.6%时,随着粘贴层数的增加,抗弯弹性模量仅提高了0.43%、5.54%、11.73%,极限承载力提高了31.82%、52.58%、36.72%^[44]。因此,通过适当增加纤维布层数,改变纤维布布置方式,能够有效提高胶合木梁的抗弯性能。

2.2.2 棒状材料增强 棒状增强材料主要用钢筋和纤维增强筋两种材料,对GLT进行开槽处理,使用胶黏剂将钢筋或纤维增强筋粘入凹槽中。筋状材料相较于木材具有高强度抗拉性能,提高了GLT底层层板抗拉性能,增强了GLT抗弯承载力。研究发现开槽会在槽口边缘形成应力集中,折损GLT抗弯承载力,开槽处理后GLT梁极限承载力降低12~13 kN,同时槽口数量增加会降低GLT抗

弯承载力,2个槽口比3个槽口的抗弯极限承载力高4.76 kN^[45]。为了保证梁底部的完整性,减少槽口边缘应力集中,对开槽采用灌胶配筋,比直接开槽配筋的GLT抗弯极限承载力提高了25%,有效减少了开槽对GLT抗弯承载力的影响^[46]。

其次,配筋布置对其抗弯极限承载力、抗弯刚度和延性系数有显著影响^[47]。当配筋率小于0.77时,玄武岩纤维筋增强胶合木梁为受拉脆性破坏,配筋率为0.77%~1.51%时为受拉延性破坏,配筋率大于1.51%时为受压延性破坏。当配筋率从0.49%增加至1.58%时,抗弯刚度提高21.1%,抗弯承载力提高34.9%^[48]。胶合木梁用钢筋增强时,主要破坏模式是受拉区底层层板发生拉断破坏和钢筋发生屈服破坏,受压区木材发生褶皱破坏^[46,49]。

2.2.3 板状材料增强 板状材料指粘嵌在GLT内部的增强材料。依据是否与GLT板面平行可以分为横嵌和竖嵌,板状增强材料主要有纤维增强板、钢板、竹板等。

1) 纤维增强板。纤维板层数和厚度能够显著提高GLT的抗弯极限抗弯承载力和抗弯刚度,研究发现两层横嵌玄武岩纤维板比一层的极限承载力提高25%,30 mm厚层板比10 mm厚的极限荷载提高0.5~7.5 kN^[50]。同时,当纤维板筋率增加0.8%,抗弯极限荷载增加5.4 kN,中轴位移增加6.9 mm,胶合木梁受压时的延性会随着配筋率的提高而增大^[51]。竖嵌碳纤维板比横嵌的增强方式对胶合木梁的抗弯承载力和极限变形影响更加显著。在相同参数下,竖嵌碳纤维板比横嵌的胶合木梁的极限荷载平均提高27.4%,最大位移平均增加20%^[52]。由于木材纤维拉伸强度低于纤维板,纤维板增强胶合木梁抗弯主要的破坏模式为受拉脆性破坏和受压塑性破坏^[53]。

2) 钢板增强。由于钢板本身的特性,增强时应采用横嵌布置,防止因竖嵌钢板屈服而降低整体增强效果^[54]。随着钢板厚度的增加,胶合木梁承载力先增大后减小^[55],主要由于钢板过厚则需要更强的胶结力,而现有的胶无法满足要求出现开胶现象,不能够充分利用木材和钢材的强度,致使梁的强度降低,因此用钢板增强时板厚不宜过高,

同时要选用胶结力强的胶黏剂或者选用螺栓加固。梁底受拉破坏、梁顶受压破坏、钢板开胶破坏和层板间撕裂破坏是钢板增强胶合木梁四种典型破坏模式^[56]。

3) 竹板增强。相较于钢板,竹板的抗拉强度高,更加环保。在胶合木梁受拉部位用竹板替换木材层板,可以充分发挥木材的抗压性能和竹材的抗拉性能,提高胶合木梁的受弯性能,还能避免木材缺陷易导致受拉区域发生破坏^[57-58]。随着竹板层数的增加,梁变形能力增强,竹木层间错动明显,致使梁的承载力先升后降^[59]。综合分析竹板和纤维板对胶合木梁弯曲性能的影响发现,在受拉侧和受压侧分别粘贴纤维板和竹板的胶合木梁的增强效果最佳,抗弯性能提高了26.96%^[60]。

通过增强材料可以有效提高GLT抗弯力学性能,扩大GLT的应用领域,使得速生材和材质差的原材料用于结构领域成为可能,弱化了木材缺陷对GLT抗弯性能的影响。但增强材料在GLT实际使用过程中也存在诸多需要研究的问题:1)如何保障增强材料与木材胶合界面质量,考察不同使用环境下胶层耐久性、耐候性及耐老化性,发挥增强材料与木材协同承载作用,避免发生分层剥离导致GLT梁失效;2)如何优化预应力的施工工艺,考虑不同形状增强材料在GLT内部弯曲应力分布,充分发挥增强材料的力学性能;3)如何降低生产成本,产品力学性能提升附加值可能不足以抵消增强材料成本投入。

3 结语

GLT是我国木结构领域主要用材,其部品部件可实现工厂化和预制化。经过多年的研究,我国在GLT领域取得了较为丰硕的研究成果,形成了包含锯材分级、材料生产加工、性能评价、构件连接节点和结构体系等方面的成熟研究体系。但同时也存在如何实现原材料国产化、分等技術工业化有待进一步研究,如何保障GLT产品胶合质量稳定性,推进产品质量认证体系建设,推动产品标准化生产有待行业进一步规范,如何优化增强方式,提高加工处理技术,完善理论计算和标准体系等方面具有很大发展空间。

参考文献:

- [1] 朱建伟. 胶合木结构建筑的发展现状及前景[J]. 现代农业研究, 2021, 27(8): 137-138.
- ZHU J W. Present situation and prospect of the construction of glued wood structure[J]. Modern Agriculture Research, 2021, 27(8): 137-138.
- [2] 陈暑冰, 佟晓超, 赵捷, 等. 胶合木生产质量控制关键点分析[J]. 建筑技术, 2022, 53(3): 270-272.
- CHEN S B, TONG X C, ZHAO J, et al. Analysis on key points of production quality control of glued wood[J]. Architecture Technology, 2022, 53(3): 270-272.
- [3] 中国建研院认证中心颁发首张CABR胶合木产品质量认证证书[J]. 建设科技, 2021(20): 6-7.
- The first CABR plywood product quality certificate issued by the certification center of China Construction Research Institute[J]. Construction Science and Technology, 2021(20): 6-7.
- [4] Johnson J W, Kunes R H. Tensile Strength of Special Douglas-Fir and Hem-Fir 2-Inch Dimension Lumber[J]. Wood & Fiber, 1975, 4: 305-318.
- [5] Samson M. Method for assessing the effect of knots in the conversion of logs into structural lumber[J]. Wood and Fiber Science, 2007, 25: 298-304.
- [6] XU P. Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber[J]. Wood Science and Technology, 2002, 36(6): 501-509.
- [7] 郭伟, 任海青, 殷亚方, 等. 北美规格材目测分等概述[J]. 世界林业研究, 2007, 20(5): 57-62.
- GUO W, REN H Q, YIN Y F, et al. Summary of visual grading on structural lumber in North America[J]. World Forestry Research, 2007, 20(5): 57-62.
- [8] 龙超, 吕建雄, 任海青, 等. 中国与加拿大规格材目测分等规则的比较[J]. 木材工业, 2008, 22(4): 23-25.
- LONG C, LU J X, REN H Q, et al. Comparison between the Chinese and Canadian visual grading rules for dimensional lumber[J]. China Wood Industry, 2008, 22(4): 23-25.
- [9] 江京辉, 吕建雄, 任海青, 等. 不同标准体系中结构用规格材目测分级规则的比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 25-29.
- JIANG J H, LYU J J, REN H Q, et al. Comparison of visual grading rules for structural lumber in different standards[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2009, 33(6): 25-29.
- [10] 姜万里, 任海青, 江京辉, 等. 落叶松规格材目测分等的研究[J]. 木材工业, 2010, 24(2): 1-4.
- LOU W L, REN H Q, JIANG J H, et al. Effects of major defects on dimensional larch lumber visual grading[J]. China Wood Industry, 2010, 24(2): 1-4.
- [11] 郭伟, 任海青, 费本华, 等. 杉木人工林3个目测等级规格材的力学性质[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 139-143.
- GUO W, REN H Q, FEI B H, et al. Mechanical properties of three grades of Chinese fir dimension lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 139-143.
- [12] 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): 66-70.
- REN H Q, GUO W, YIN Y F. Machine grading of lumber in North America[J]. World Forestry Research, 2006, 19(3): 66-70.
- [13] 江京辉, 吕建雄, 任海青, 等. 3种无损检测技术评估足尺规格材的静态弹性模量[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(3): 277-281.
- JIANG J H, LU J X, REN H Q, et al. Evaluation of modulus of elasticity for dimension lumber by three nondestructive techniques[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(3): 277-281.
- [14] 江京辉, 吕建雄, 任海青, 等. 动态弹性模量用于评估不同等级规格材的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 63-66.
- JIANG J H, LYU J X, REN H Q, et al. Assessment of different grade dimension lumber by dynamic modulus of elasticity[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2008, 32(2): 63-66.
- [15] 周海宾, 任海青, 吕建雄, 等. 分等方法对我国人工林杉木规格材等级的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 296-301.
- ZHOU H B, REN H Q, LYU J X, et al. Effects of grading methods on dimension lumber grades for Chinese fir plantation[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 296-301.
- [16] 王朝晖, 任海青, 骆秀琴, 等. 落叶松规格材机械应力分等方法的研究[J]. 木材工业, 2009, 23(3): 1-4.
- WANG Z H, REN H Q, LUO X Q, et al. Mechanical stress grading of larch dimension lumber from northeastern China[J]. China Wood Industry, 2009, 23(3): 1-4.
- [17] 任海青, 郭伟, 费本华, 等. 轻型木结构房屋用杉木规格材机械应力分等研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 363-366.
- REN H Q, GUO W, FEI B H, et al. Mechanical stress grading of Chinese fir dimension lumber for light wood structure houses[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3): 363-366.
- [18] 姜万里, 任海青, 王朝晖, 等. 落叶松结构用规格材的机械分级研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 29-32.
- LOU W L, REN H Q, WANG Z H, et al. Mechanical grading of larch structural dimension lumber[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(7): 29-32.
- [19] Kretschmann D E, Green D W. Mechanical grading of oak timbers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(2): 91-97.
- [20] 堀江秀夫, 合田久敬. 构造用指接集成材的强度性能[J]. 林产试研报, 1986(75): 45-47.
- Horie H, Kurata H. Strength properties of structural finger-jointed lumber[J]. Report of the Hokkaido Forest Products Research Institute, 1986(75): 45-47.
- [21] 叶琦, 管成, 张厚江, 等. 辐射松层板抗弯性能的指接参数优化及无损检测研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 148-160.
- YE Q, GUAN C, ZHANG H J, et al. Optimization of finger joint parameters and nondestructive testing of bending properties of radiata pine laminates[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 148-160.
- [22] 林兰英, 傅峰. 人工林桉树木材指接工艺研究[J]. 木材加工机械, 2007, 18(1): 10-15.
- LIN L Y, FU F. Study on the finger-joint technology for *Eucalyptus* plantation[J]. Wood Processing Machinery, 2007, 18(1): 10-15.
- [23] Özçifçi A, Yapıcı F. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1543-1550.
- [24] 李海栋, 王朝晖, 黄仲华, 等. 落叶松结构用胶合木层板指接工艺参数对力学性能的影响[J]. 林产工业, 2014, 41(1): 13-18.
- LI H D, WANG Z H, HUANG Z H, et al. Effects of finger-jointing parameters on mechanical properties of dahurian larch laminate for structural glulam[J]. China Forest Products Industry, 2014, 41(1): 13-18.
- [25] 黄仲华, 王朝晖, 李海栋. 结构用落叶松材指接工艺试验研究[J]. 木材加工机械, 2012, 23(2): 21-25.
- HUANG Z H, WANG Z H, LI H D. Research of manufacture process for *Larix gmelini* finger-joint structural timber[J]. Wood Processing Machinery, 2012, 23(2): 21-25.
- [26] 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.
- ZHOU H B, SUN H L, ZHANG J Z, et al. Factors influencing strength properties of structural glulam[J]. Journal of Building

- Materials, 2014, 17(3): 553-558.
- [27] 孙健, 傅峰. 人工杉木胶合工艺优化研究[J]. 木材加工机械, 2011, 22(3): 28-31, 41.
- SUN J, FU F. Study on optimizing for methods of gluing of Chinese Fir wood[J]. Wood Processing Machinery, 2011, 22(3): 28-31, 41.
- [28] 赵立, 申士杰, 李杰. 不同胶黏剂不同树种结构用集成材胶合性能的研究[J]. 林产工业, 2015, 42(11): 39-42, 45.
- ZHAO L, SHEN S J, LI J. Study on gluing property to structural glulam with different types of adhesive and timber[J]. China Forest Products Industry, 2015, 42(11): 39-42, 45.
- [29] 胡南, 李贤军, 谢力生, 等. 工程胶合木胶合成型工艺优化研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(1): 142-145.
- HU N, LI X J, XIE L S, et al. Study on optimized gluing and forming process for *Larix gmelini* engineering glued laminated timber[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(1): 142-145.
- [30] 周淑容, 冯蜀逸, 熊刚, 等. 现代胶合木梁弯曲性能试验研究[J]. 建筑技术, 2020, 51(3): 307-310.
- ZHOU S R, FENG S Y, XIONG G, et al. Experimental study on flexural behavior of glulam beams[J]. Architecture Technology, 2020, 51(3): 307-310.
- [31] 刘建萍. 胶合木胶合质量影响因素浅析[J]. 木材工业, 1998, 12(6): 28-30.
- LIU J P. Factors affecting bonding strength of glued lumber[J]. China Wood Industry, 1998, 12(6): 28-30.
- [32] 王解军, 刘艳格, 宁凡. 胶缝缺陷对木梁承载能力的影响[J]. 公路工程, 2018, 43(6): 22-25, 121.
- WANG J J, LIU Y G, NING F. The influence of glue line defects on bearing capacity of glulam beam[J]. Highway Engineering, 2018, 43(6): 22-25, 121.
- [33] 王解军, 刘艳格, 宁凡. 胶缝缺陷对木梁抗弯刚度影响研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 77-80.
- WANG J J, LIU Y G, NING F. Study on the influence of glue line defect on flexural rigidity of glulam beams[J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 77-80.
- [34] BOHANNAN B. Effect of size on bending strength of wood members[R]. United States Forest Service Research Paper FPL 56. Madison: Forest Products Laboratory USDA Forest Service, 1996.
- [35] 周先雁, 曹磊, 曾丹, 等. 胶合木梁抗弯承载力分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(22): 91-96.
- ZHOU X Y, CAO L, ZENG D, et al. Flexural capacity analysis of glulam beams[J]. Building Structure, 2015, 45(22): 91-96.
- [36] Franke S, Franke B, Harte A M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - State of the art[J]. Construction and Building Materials, 2015, 97: 2-13.
- [37] 曹磊, 张仲凤, 曾丹, 等. 落叶松胶合木梁疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 27-35.
- CAO L, ZHANG Z F, ZENG D, et al. Experimental research on fatigue behavior of larch glulam beams[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 27-35.
- [38] 张庆. 层板胶合木梁受力性能的试验探究[J]. 四川建材, 2018, 44(9): 76-77.
- [39] 陈溪, 吴勇, 陈玲珠, 等. 9 m长胶合木梁受弯性能和炭化速度的试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 63-67, 131.
- CHEN X, WU Y, CHEN L Z, et al. Experimental research on flexural behavior and charring rate of a 9-meter-span long glulam beam[J]. Industrial Construction, 2018, 48(3): 63-67, 131.
- [40] 奉佳, 王雪亮, 徐乾罡, 等. 指接足尺层板胶合木梁抗弯试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 252-255.
- FENG J, WANG X L, XU Q G, et al. Experimental research on flexural behavior of finger-jointed full-size glued-laminated timber beams[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 252-255.
- [41] Plevris N, Triantafillou T C. FRP-reinforced wood as structural material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(3): 300-317.
- [42] Wdowiak-Postulak A, Świt G. Behavior of glulam beams strengthened in bending with BFRP fabrics[J]. Civil and Environmental Engineering Reports, 2021, 31(2): 1-14.
- [43] 王玉镯, 马云鹏, 王兰芹, 等. 碳纤维增强速生杨胶合木梁的受弯性能[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-13[2021-08-26].
- WANG Y Z, MA Y P, WANG L Q, et al. Flexural behavior of fast-growing poplar glulam beams reinforced by carbon fiber[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-13[2021-08-26].
- [44] CHEN Z X, HE R L, ZHAO Q Q, et al. Test on the mechanical performance of glue-laminated timber reinforced with GFRP for structural materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 847: 53-59.
- [45] 王菲彬, 杨晓琳, 徐伟涛, 等. GFRP筋增强胶合木梁抗弯性能研究[J]. 林产工业, 2017, 44(11): 18-23.
- WANG F B, YANG X L, XU W T, et al. Study on bending behavior of glulam beams reinforced with bonded-in GFRP rods[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(11): 18-23.
- [46] 左宏亮, 付丁虬, 邱一桐, 等. 配筋形式对配筋胶合木梁受弯性能影响试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 621-628.
- ZUO H L, FU D Q, QIU Y T, et al. Bending performance test on the different forms of reinforced glulam beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(4): 621-628.
- [47] Yeboah D, Gkantou M. Investigation of flexural behaviour of structural timber beams strengthened with NSM basalt and glass FRP bars[J]. Structures, 2021, 33: 390-405.
- [48] 陈爱军, 贺国京, 蔡郭圣, 等. BFRP筋增强胶合木梁受力性能分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 107-113.
- CHEN A J, HE G J, CAI G S, et al. Experimental study on mechanical behaviour of glulam timber beams reinforced with BFRP[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(3): 107-113.
- [49] 左宏亮, 李熠诗, 付丁虬, 等. 尺寸效应对配筋胶合木梁受弯性能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(8): 62-65.
- ZUO H L, LI Y S, FU D Q, et al. Bending performance test on the different forms of reinforced glulam beams[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(8): 62-65.
- [50] 李志强, 王小东. 玄武岩纤维增强组合木梁抗弯性能的试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017, 35(2): 25-30.
- LI Z Q, WANG X D. Study on flexural behavior of fiber-reinforced composite timber beams with basalt[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2017, 35(2): 25-30.
- [51] 杨会峰, 刘伟庆. FRP增强胶合木梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007(01): 64-71.
- YANG H F, LIU W Q. Study on flexural behavior of FRP reinforced glulam beams[J]. Journal of Building Structures, 2007(01): 64-71.
- [52] 陆伟东, 刘伟庆, 耿启凡, 等. 竖嵌CFRP板条层板增强的胶合木梁受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 151-157.
- LU W D, LIU W Q, GENG Q F, et al. Study on flexural behavior of glued laminated timber beams reinforced with vertical CFRP lath inlay[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 151-157.
- [53] 卜娜蕊, 王小东, 孔祥强, 等. 玄武岩纤维增强整体木梁抗弯性能的承载力计算[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017, 35(4): 41-45, 50.
- BU N R, WANG X D, KONG X Q, et al. Calculation of flexural capacity of the overall performance of the basalt fiber-reinforced beams[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2017, 35(4): 41-45, 50.