

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020002

层板钉合木 (NLT) 研究与应用现状

武国芳¹, GONG Meng², 任海青¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 新不伦瑞克大学, 福莱德里克顿 E3B5A3)



摘要: 层板钉合木 (nail-laminated timber, NLT) 是一种大尺寸板材产品, 可用作桥面板、楼屋面板和墙体等承重构件, 在欧美地区有一百余年的使用历史。在全球重型木结构快速发展的背景下, 层板钉合木迎来新的发展机遇。层板钉合木引入我国的时间不长, 相关研究和应用较少。本文全面梳理层板钉合木的技术特点、规范标准和研究应用现状, 分析存在的问题, 并提出研究方向建议, 为我国层板钉合木的研究应用提供参考。

关键词: 层板钉合木; 工程木; 重型木结构

中图分类号: S781.6; TS62; TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0009-05

Review of Research Status and Application of Nail-laminated Timber

WU Guo-fang¹, GONG Meng², REN Hai-qing¹

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

2. University of New Brunswick, Fredericton E3B5A3, Canada)

Abstract: Nail-laminated timber (NLT) is one kind of mass timber/panel products. It has been used as load carrying members such as bridge decks, floors, roofs, walls, etc., for more than a century in Europe and North America. Application of NLT has undergone resurgence as part of the global modern mass timber movement in the building industry. Having only been introduced into China recently, there is a shortage of research works and application experiences. The characteristics, code provisions and research status related to NLT were comprehensively summarized in this paper. The confronted problems were analyzed and the future research topics were recommended. This work presents a basis for the application of NLT in China.

Key words: nail-laminated timber; engineered wood; mass timber structure

在环境污染和能源消耗日益突出背景下, 发展绿色建筑、装配式建筑已成为全球共识。重型木结构 (mass timber construction, MTC) 作为一种绿色建筑, 相较于钢、混凝土结构和传统木结构具有多种优势, 近年来在全球发展非常迅速^[1]。与传统木结构相比, 重型木结构以大尺寸板材 (mass timber panel, MTP) 等工程木产品作为主要建筑材料, 建

造方式以预制化和装配化为主要特点^[2]。常见的大尺寸板材有正交胶合木 (cross-laminated timber, CLT)、层板胶合木 (glue-laminated timber, GLT)、单板层积材 (laminated veneer lumber, LVL) 和层板钉合木 (nail-laminated timber, NLT) 等。大尺寸板材具有良好的承载、防火和隔声性能, 是极具发展前景的一类木材产品^[1]。其中, LVL 以单板为原料, 组成单元尺寸小, 用胶量大; CLT 和 GLT 以锯材为原料, 组成单元尺寸较大, 用胶量小; 而 NLT 不使用胶黏剂。另外, CLT、GLT 和 LVL 生产过程中均需使用压机施压, 因此产品一般为平板,

收稿日期: 2020-01-07; 修改日期: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金“正交胶合木构件受压失稳机理及计算方法研究” (51808546)。

作者简介: 武国芳 (1986—), 助理研究员。Email: g.f.wu@criwi.org.cn

而NLT可以在工厂或现场组装,并且可以变换层板排列方式,制作出各种造型的板材。与其他MTP相比,NLT更具灵活性,应用范围较广。NLT在欧美地区有一百余年的使用历史,引入我国的时间不长。鉴于此,笔者对NLT的特点、应用及研究现状进行总结,并分析未来研究方向,以期为我国层板钉合木的研究应用提供参考。

1 层板钉合木(NLT)的特点

1.1 NLT的构成

如图1所示,层板钉合木是将层板沿宽面法线方向叠合、钉合而成的一种木产品。所用层板通常是规格材,也可采用结构指接材、单板层积材等其他工程木产品,组合时层板通常不再进行刨切处理。如层板长度不足,可对接或斜接接长,但是接头位置分布应满足一定要求。钉可采用圆钉、麻花钉、螺钉等木结构用钉,可垂直钉入或呈一定角度钉入,其长度至少应穿透2层层板并钉入第3层层板中。相邻层板上钉的位置需错开,避免互相干扰;在对接接头、构件端部可适当增加钉的数量。

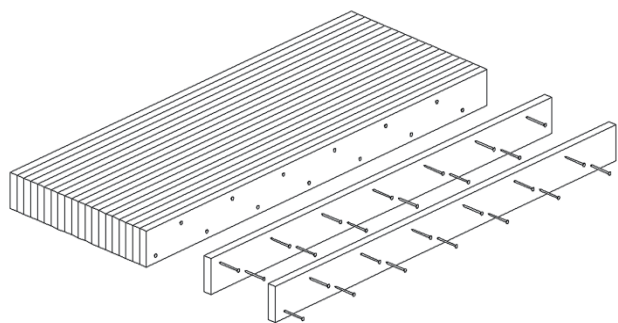


图1 层板钉合木构造
Fig.1 Formation of NLT

层板钉合木各层板之间可以互相传递荷载,薄弱层板中的载荷可由相邻层板分担,降低了缺陷对整体构件的影响,因而其力学性能的变异性低于各层板,从而提高了材料利用率,是一种性能优良的产品^[3]。层板钉合木不全是平板式的,通过层板排列模式的变化可制作造型各异的层板钉合木构件,图2给出了几种层板排列模式的示例。

层板钉合木制作过程中不使用胶黏剂,是一种绿色环保的建材,此外还具有美观、经济、可工业化生产等诸多优点:作为一种大尺寸板材,层板钉合

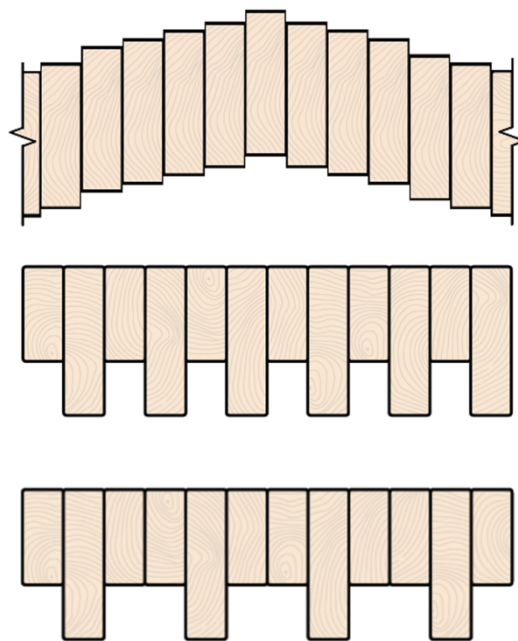


图2 几种层板排列模式
Fig.2 Various layouts of NLT

木的耐火性能优良且外观优美,可无需饰面使用,充分展示木材的美感和质感;制造工艺简单、现场施工便捷,无需特殊机械;可通过层板排列模式的变化,做出各种造型,具有更强的建筑表现力;可在工厂预制,现场安装,实现工业化生产。

层板钉合木也有一些缺点:由于钉的存在,层板钉合木的后期加工性能不太好;由于钉连接是一种柔性连接,在荷载作用下层板之间存在相对变形,特别是在集中荷载作用下容易造成各部分变形不均匀,进而破坏铺设的面层,造成面层开裂或渗水,影响其耐久性。前者可以通过设计和制作相协调予以避免,后者可通过合理布置支撑、改进连接形式或以组合构件应用等方式予以解决。

1.2 NLT的应用

层板钉合木是最早出现的大尺寸板材,19世纪初,欧美地区就已将其应用于厂房等建筑中,如用于纺织厂和锯木厂的楼板,用作减震材料等,距今已有一百余年历史^[4]。随着混凝土、钢材和胶合木等工程木产品的出现,层板钉合木自20世纪后期应用逐渐减少。近些年,随着重型木结构概念的提出和发展,层板钉合木再次受到建筑行业的青睐,并在木结构中大量应用^[1]。在多高层木结构中,层板钉合木和正交胶合木通常被视为两种同等重要的产品^[5],

然而层板钉合木进入我国的时间较短,尚未受到足够关注。对层板钉合木开展研究,完善相关理论,建立技术标准,将有助于推进我国木结构特别是多高层木结构的快速发展。

层板钉合木在欧美均有广泛应用。据报道,1920—1960年间,北美大部分桥梁的桥面板是由层板钉合木建造的^[4]。在现代木结构中,层板钉合木更多地被用作建筑的墙体、楼盖和屋盖,在欧美的住宅、学校、车站、游泳馆等工程中大量应用^[1,6]。层板钉合木通常直接裸露,通过排列方式的灵动变化,营造出独特的美感,深受建筑师喜爱。2008年建成的里士满奥林匹克馆(图3a),采用以2×4英寸规格材制作的V型截面层板钉合木作为屋盖,跨度达42英尺(约12.8 m),不仅造型优美,而且结构合理。



a. 里士满奥林匹克馆(来源:Thinkwood)



b. 万科青岛小镇游客中心(来源:中国建筑中心)

图3 层板钉合木建筑

Fig.3 NLT Buildings

层板钉合木在我国属于一种较新的材料,尚未大量推广,但已有数个典型工程。2012年建成的万科青岛小镇游客中心的三维曲面屋盖即使用NLT建造(图3b),屋面面积2 000余m²,由93根锥形胶合木柱直接支撑,不仅造型优美,而且结构稳固^[7],彰显了层板钉合木良好的结构与建筑特性。另外天津滨海新区中加生态示范区正新建一栋8层的现代木

结构酒店,设计采用混凝土核心筒-木框架结构,以层板钉合木作为楼板,建成后将成为我国最高的现代木结构建筑。

2 NLT的研究现状

2.1 规范标准

层板钉合木的设计原则和方法已纳入一些国外标准中。加拿大木结构设计规范^[8]中对层板钉合木楼板的层板、钉规格和间距、层板接头位置进行了规定,并对满足一定要求的层板钉合木楼板给出了挠度计算式,但未给出承载力计算式。加拿大高速公路桥梁设计规范^[9]对层板钉合木桥面板的层板、钉长度和间距、层板接头数量和位置以及下方结构的锚固方法提出了要求。计算层板钉合木构件抗弯刚度时,仅考虑构件中通长层板的抗弯刚度,忽略有接头层板的贡献。但亦未给出承载力计算方法。需要指出的是,上述两本规范对层板钉合木的构造要求和弯曲刚度计算方法的相关规定并不一致。欧洲木结构设计规范^[10]对于没有接头的层板钉合木桥面板的承载力计算给出了规定,对于有接头的工况,未给出计算方法。

国际建筑规范(IBC)^[11]也对层板钉合木的构造作出了规定。依据该规范,钉的位置与层板钉合木的支撑间距有关,支撑间距较大时,钉间距应小,支撑间距较小时,钉间距应大;允许的接头数量和可出现接头的位置均有明确要求。

2017年,美加双边软木协会(Binational Softwood Lumber Council)和林创投资公司(Forestry Innovation Investment Ltd)整理了NLT的技术资料,编写了《层板钉合木设计和施工导则》(Nail-laminated Timber Design & Construction Guide)^[6],对层板钉合木在防火、结构设计、制造等方面给出了建议,是目前为止较为全面的一本技术资料。需要注意的是,该导则未经严格的规范编制和审查程序,是推荐性的文件,不具有约束性。

目前我国还没有层板钉合木的标准,甚至连命名方式也未统一,相关研究尚属空白。

2.2 研究现状

1) 钉的影响。

层板钉合木通过钉连接组合在一起,钉连接对层板钉合木性能有重要影响,因此钉连接的相关研

研究成果对于层板钉合木有很大的参考价值。对于层板钉合木,研究发现随着钉间距缩小,其承载力和刚度呈增大趋势^[12-13],但当钉间距过小时,承载力和刚度将不再增加,并且易在钉孔位置出现劈裂破坏^[14]。

目前对于钉间距影响的研究结论仍然是定性的,还需通过进一步研究提出合理的优化方法。也有学者研究了钉种类、钉入方式以及含水率对层板钉合木力学性能及耐久性的影响,并优选了钉种类及钉入方法等参数^[13,15]。然而上述研究结论并不一致,还不能用于指导工程实践。

2) 层板接头。

层板在接头处断开,该处的内力传递将会中断,必然会对层板钉合木的力学性能造成影响。相关研究发现,层板接头的存在会显著削弱层板钉合木的抗弯刚度^[13,16-17],特别是当接头排列成同一直线时,对整体刚度的削弱最严重。基于上述研究结果,建议在验算时不考虑接长层板对整体构件刚度的贡献^[16]。该方法是一种偏于保守的方法,还需通过深入研究量化不同接头分布形式对层板钉合木力学性能的影响,从而提出准确的计算方法。

3) 设计方法。

层板钉合木的承载力和刚度与层板的尺寸、树种和等级,层板接头数量和位置,层板接头的形式和加载形式等因素有关^[18],其设计计算方法较为繁杂。目前主流思想是将层板钉合木等效为一定宽度的、没有接头且不考虑钉连接影响的通长层板进行计算,而等效宽度则是钉间距、接头、层板尺寸等参数的函数。该函数关系可以通过试验测得,如在桥面板中,Bakht^[19]通过实测桥面的挠度分布,分析得到了等效宽度经验计算公式;另一种方法是通过有限元方法进行分析,对跨高比、钉直径和间距等参数对层板钉合木的力学性能的影响规律进行研究,并经过回归得到等效宽度的经验计算式。Kraemer^[20]即依据该方法提出了一套经验计算式,有学者对该方法进行了试验验证,发现结果较为准确^[21]。但上述研究未考虑不同类型钉以及不同钉入方式的差异,因此还需进一步丰富研究参数,方可提出全面、实用设计方法。

4) 承载方式。

层板钉合木是一种板式构件,其不同方向的受

力性能也有差异。研究发现,相比于层板平置,层板侧立时层板钉合木的刚度和承载力较大,但是延性稍差^[12]。另外,对于常见钉连接间距,层板间的抗剪强度只有胶粘接的1/5左右,因此层板钉合木的面内抗剪性能较胶合木差,层板钉合木墙体的面内刚度较弱^[17]。基于上述研究成果,层板钉合木最合理的使用方式是承受面外弯矩并使层板侧立,如果作为剪力墙使用,尚需研究如何提高面内抗剪性能。

5) 隔声抗火性能。

隔声和抗火性能方面,加拿大国家研究委员会^[22]开展了层板钉合木和正交胶合木的隔声性能试验,获得了典型厚度层板钉合木板的隔音等级,研究了覆面材料对隔声性能的影响。2019年,为了完成中加生态示范区高层木结构项目,加拿大木业协会委托中国建筑科学研究院进行了2块足尺层板钉合木楼板的负荷耐火性能试验,发现两块试件的耐火极限均超过了2小时,高于《木结构设计标准》^[23]对承重墙和梁(1h)、楼板(0.75h)耐火极限的要求,证明了层板钉合木的优良耐火性能。上述研究对于层板钉合木的推广具有重要的意义。

6) 新材料开发。

一些学者探索了用速生材、小径材和低等级材料制作层板钉合木的可行性^[24-26]。对两种速生澳大利亚桉树制作的层板钉合木的抗弯性能和振动性能的研究发现,2种产品在短期荷载和长期荷载作用下都可以满足办公和居住建筑的极限状态要求^[24-25]。这些研究对于我国发展桉树层板钉合木产品、人工林材料的高效利用也有较大参考价值。

3 研究方向建议

层板钉合木有较长的发展历史,且形成一定的研究成果,但以往多用于轻载桥面板和单层楼屋盖中。而在重型木结构中,层板钉合木一般作为楼屋盖和墙体使用,受力形式有所不同。在承受竖向荷载的基础上,还需承担将荷载可靠传递至其他构件的功能,对其性能提出了更高要求。目前对层板钉合木的研究成果还不足以指导工程实践,针对上述新的需求,建议从以下方面进一步开展研究工作:

1) 设计计算方法研究。目前层板钉合木的抗弯刚度和承载力的设计计算方法仍然缺失。在荷载作用下,如何确定荷载的传递范围、等效承载宽度;

层板钉合木中分布着大量层板对接接头,这些对接接头对抗弯刚度和承载力的影响规律;不同钉间距、支撑情况等对层板钉合木性能的影响规律。对上述问题均需进一步展开研究,才可能提出可靠的设计计算方法。

2) 承载性能提升方法研究。由于钉连接的刚度有限,层板钉合木的刚度较胶合木小,容易出现面外荷载作用下局部变形过大的问题。作为墙体时,层板钉合木需承担水平荷载,作为楼盖需要承担荷载分配功能,均对层板钉合木的面内刚度和承载力提出了较高要求。因此需进一步研究钉类型、布置和钉入方式对承载性能的影响,或者研究销连接替代钉连接、甚至采用预应力等方法增强层板间连接性能的方法。

3) 一体化组合构件的研发。层板钉合木较易与其他材料进行组合而形成组合构件,可进一步研究与其他材料的搭配方法,更好地实现预制装配化生产。如在层板间添加抗剪连接件,再在上部浇筑混凝土,形成组合板,可同时达到提高整体性以及耐火极限的效果。

参考文献:

- [1] Gong M. Lumber-based mass timber products in construction in timber buildings and constructions[M]. IntechOpen, 2019.
- [2] Harte A M. Mass timber-The emergence of a modern construction material[J]. Journal of Structural Integrity and Maintenance. 2017, 2(3): 121-132.
- [3] Natterer J K. New technologies for engineered timber structures[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4(3): 245-263.
- [4] Hong K E M. Structural performance of nail-laminated timber-concrete composite floors[D]. University of British Columbia, 2017.
- [5] Bowyer J, Bratkovich S, Howe J, et al. Modern tall wood buildings: Opportunities for Innovation[R]. Minneapolis, MN: Dovetail Partners Inc, 2016.
- [6] WoodThink. Nail-laminated timber Canadian design & construction guide[M]. Think Wood, 2017.
- [7] 钟恺琳. 万科青岛小镇游客中心:一排充满韵律感的“树”[J]. 房地产导刊, 2017(9): 67-70.
- [8] Canadian Standard Association. CSA O86-14 Engineering Design in Wood[S]. Mississauga, Ontario, 2014.
- [9] Canadian Standard Association. CSA S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code [S]. Mississauga, Ontario, 2014.
- [10] European Committee for Standardization. EN 1995-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures-Part 2: Bridges[S]. Bruxelles, Belgium, 2004.
- [11] International Code Council. International building code[M]. Country Club Hills, IL, USA, 2018.
- [12] Tjondro J A, Budianto H, Aryakusuma W. The flexural strength and rigidity of Albasia nail-laminated beam[C]. Civil Engineering Forum, 2011.
- [13] Ogunrinde O. Evaluation of bending performance of nail laminated and dowel laminated timber [D]. University of New Brunswick, 2019.
- [14] Alam P, Ansell M. The effects of varying nailing density upon the flexural properties of fitch beams [J]. Journal of Civil Engineering Research, 2012, 2(1): 7-13.
- [15] ZHU W. Moisture content and joint behavior of bridge decks made of mechanically laminated timber [D]. University of New Brunswick, 2018.
- [16] Jaeger L G, Bakht B. Effect of butt joints on the flexural stiffness of laminated timber bridges [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1990, 17(5): 859-864.
- [17] Haller P. Experimental and numerical study of nailed laminated timber elements for in plane and transverse loading [C]. World Conference on Timber Engineering 2000, Dresden, Germany, 2000.
- [18] Williams G D, Bohnhoff D R, Moody R C. Bending properties of four-layer nail-laminated posts[M]. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994.
- [19] Bakht B. Load distribution in laminated timber decks [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(7): 1551-1570.
- [20] Kraemer V. Load carrying capacity of nail-laminated timber loaded perpendicular to its plane [J]. Structural Building Components Associated, 2004.
- [21] Tannert T, Poblete C, Gotelli G. Propiedades mecánicas de elementos laminados clavados[J]. Maderas-Ciencia y tecnología, 2003, 5(1): 51-67. [in Spanish]
- [22] Mahn J, Quirt D, Hoeller C, Mueller-Trapet M. Addendum to RR-335: sound transmission through nail-Laminated timber (NLT) assemblies[R]. National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2018.
- [23] GB 50005—2017, 木结构设计标准[S].
- [24] Derikvand M, Kotlarewski N, Lee M, et al. Short-term and long-term bending properties of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 952-964.
- [25] Derikvand M, Jiao H, Otlarewski NK, et al. Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(3): 421-437.
- [26] Herberg E. Flexural performance of nail-laminated timber crane mats [D]. University of Minnesota, 2018.

(本文编校 向 琴)