

编者按: 中国林科院木材工业研究所承担的“十二五”国家科技支撑计划“木质复合材料制造关键技术研究”课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”任务, 开展了轻型木结构木质复合材料制造技术、性能评价技术及安全设计技术等研究, 目前已获得国产规格材的强度设计指标、国产木桁架和结构用木质保温板的优化工艺等多项成果。

本刊自2017年第1期起, 系列报道此项研究的成果, 为我国木质复合材料的应用研究提供参考, 为木质复合材料构件在轻型木结构建筑中的应用提供技术支撑。

国产落叶松规格材齿板拉伸承载性能研究

王 滋¹, 王 丽¹, 武国芳¹, 吴 勇², 丁青峰², 赵荣军¹

(1. 中国林科院木材工业研究所; 中国林科院林业新技术研究所, 北京 100091; 2. 苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司, 苏州 215100)

摘要: 为缓解我国结构材主要依靠进口的现状, 对三种国产规格材及国产齿板进行拉伸试验, 分析其破坏形式、承载力和延性。结果表明: 在荷载平行于木纹方向时, 兴安落叶松节点延性最好, 进口云杉节点延性最差; 在荷载垂直于木纹方向时, 日本落叶松齿板节点延性最好, 兴安落叶松节点延性最差。

关键词: 日本落叶松; 兴安落叶松; 云杉; 国产齿板; 拉伸承载力

中图分类号: TS6; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2017) 03-0010-04

Load Carrying Capacity of Truss Plate Joints for Domestic Larch Dimensional Lumber

WANG Zi¹, WANG Li¹, WU Guo-fang¹, WU Yong², DING Qing-feng², ZHAO Rong-jun¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry (CAF); Research Institute of Forestry New Technology, CAF;

2. Suzhou Crownhomes Limited Company, Suzhou 215100, Jiangsu, China)

Abstract: Dimensional lumber from *Larix kaempferi*, *Larix gmelinii* and *Picea sitchensis* were selected and jointed with domestic truss plates, respectively, to test joint failure, ultimate load carrying capacity and ductility of the jointed components. Testing results indicated that with loading parallel to wood grain, *Larix gmelinii* dimension lumber joints presented the highest ultimate load carrying capacity and the *Picea sitchensis* dimension lumber joints showed the lowest. Under loading vertical to wood grain, *Larix kaempferi* dimension lumber joints presented the highest ultimate load carrying capacity and *Larix gmelinii* dimension lumber joints showed the lowest.

Key words: *Larix kaempferi*; *Larix gmelinii*; *Picea sitchensis*; domestic truss plate; ultimate load carrying capacity

收稿日期: 2017-03-08; 修改日期: 2017-04-01

基金项目: “十二五”国家支撑计划课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”(2015BAD14B0502); 国家林业局林业科技成果推广项目“新型国产材木结构墙体与桁架连接技术应用与示范”(201409)。

作者简介: 王滋(1992—), 女, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

责任作者: 赵荣军, 女, 中国林科院木材工业研究所/林业新技术研究所研究员, 博士生导师。

轻型木结构建筑源自北美, 具有质轻强度高、节能环保、施工效率高等特点, 在 20 世纪 90 年代引入我国^[1-2]。但由于缺少适宜的国产建筑材料, 使其建造成本较高, 增加了推广应用的难度。因此, 开发适用于轻型木结构的国产规格材以及金属连接件, 成为我国建筑与木材加工行业研发的重点。

落叶松是我国北方重要的用材林树种之一^[3], 分布面积较广, 储蓄量大, 在东北地区占针叶林总蓄积量的 39.4%, 占大兴安岭地区总蓄积量的 67%^[4-5]。开发国产落叶松规格材在轻型木结构建筑中的利用, 具有重要意义。

笔者以日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 和兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 两种国产落叶松规格材为主要材料, 以进口北美云杉 (*Picea sitchensis*) 规格材作为对照, 用国产齿板制成齿板连接节点 (简称节点) 试件, 通过拉伸试验对其节点的破坏形式、极限承载力和延性等进行对比分析, 探讨国产落叶松规格材齿板节点的拉伸性能, 为其在轻型木结构建筑中的推广应用, 提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 规格材: 日本落叶松 (*Larix kaempferi*)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*), 分别采自辽宁清原、黑龙江大兴安岭, 原木小头直径 ≥ 24 cm; 加拿大云杉 (*Picea sitchensis*), 外购。尺寸均为 38 mm $\times$ 89 mm $\times$ 2 500 mm。

按照 GB/T 1929-2009《木材物理力学试验锯解及试样截取方法》, 对三种规格材进行加工取样。调整试材含水率 12% 左右, 采用机械分等法, 选用 IIIc 等级规格材, 节点连接处避开节疤、开裂等缺陷。

依据 GB/T 1933-2009《木材密度测定方法》、GB/T 1935-2009《木材顺纹抗压强度试验方法》、GB/T 1936.2-2009《木材抗弯弹性模量测定方法》, 检测三种试材的性能指标, 结果列于表 1。

表 1 三种规格材主要物理力学性能指标

Tab.1 Physical and mechanical properties of three kinds of dimensional lumbers

树种	试件数量	密度/(g·cm ⁻³)		顺纹抗压强度/MPa		弹性模量/GPa	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
日本落叶松	30	0.47~0.76	0.62	35.10~72.90	54.87	5.65~15.50	12.27
兴安落叶松	28	0.57~0.80	0.66	39.00~66.40	53.94	5.98~21.45	14.87
北美云杉	30	0.39~0.55	0.47	26.60~52.20	42.51	4.20~10.87	7.61

2) 齿板: 国产普通齿板, 采用 Q235 碳素结构

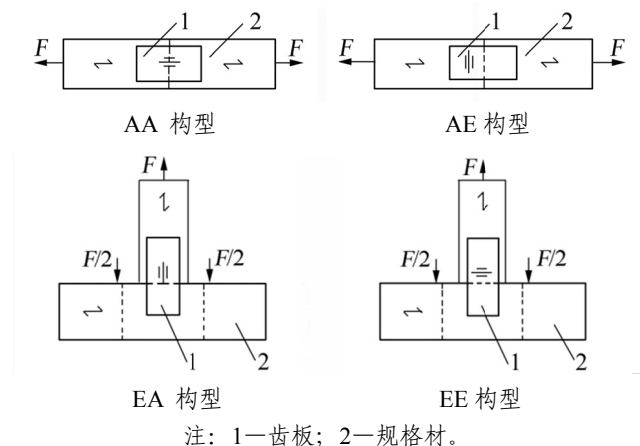
钢制成, 齿板厚度为 0.9~1.0 mm, 齿长约为 10.4~10.9 mm, 齿密度为 106~108 No/dm²。

1.2 试验设备

WDW-300E 型万能力学试验机、YHD-100 型位移引伸计、YSV8320 静态应变仪等。

1.3 试样制备

将规格材截成 300 mm 长, 根据 GB 50005-2003《木结构设计规范》规定, 设计 4 种节点构型 (图 1), 分别为: 荷载平行于木纹及齿板主轴方向 (AA); 荷载平行于木纹, 但垂直于齿板主轴方向 (AE); 荷载垂直于木纹方向, 但平行于齿板主轴方向 (EA); 荷载垂直于木纹及齿板主轴方向 (EE); 每种构型试样为 5 个。



注: 1—齿板; 2—规格材。

图 1 节点构型示意图

Fig.1 Scheme of joint configurations

为方便连接夹具, 在规格材距离端头 90 mm 处打孔, 孔径为 18 mm。绘制齿板安装标志线和中线, 用平压机将齿板压入规格材。试件放置于 (20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C、相对湿度 (65 $\pm$ 5) % 的恒温恒湿箱平衡一周, 以释放齿板应力。

1.4 试验方法

根据 GB 50005-2003《木结构设计规范》附录 M 要求, 进行节点拉伸试验, 加载速度为 1 mm/min, 当试件破坏或荷载出现明显下降时停止试验, 每个试件的试验时间在 5~20 min。

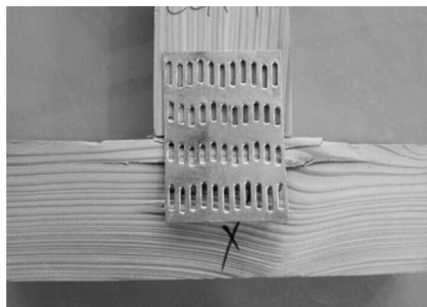
2 结果与分析

2.1 试验现象与破坏形式

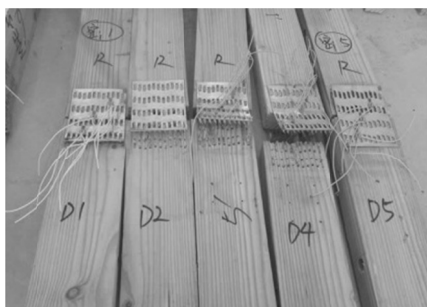
节点承载能力与其破坏形式具有明显联系, 破坏形式是齿板与木材接合能力的直观表现^[6]。

1) 当荷载平行于纹理方向时, 试验开始几分钟后, 试件发出轻微脆响, 板齿在木材中错动, 引起木材纤维撕裂; 之后声音持续变大, 板齿慢慢发生变形; 随着荷载继续增大, 齿板边缘部分开始滑出, 直至节点破坏发出一声脆响, 齿板彻底拔出, 试验结束, 试件破坏正常^[7]。

2) 当荷载垂直于纹理方向时, 随着荷载的施加, 试件亦发出轻微的声音。在齿板拔出过程中, 兴安落叶松沿纹理方向出现撕裂, 并随着荷载的增加而逐渐增大, 直至节点失去承载能力, 破坏形式表现为木材撕裂(图2a); 日本落叶松及北美云杉的破坏现象则为板齿拔出(图2b、2c), 与荷载平行于纹理方向时相似。



a 兴安落叶松节点破坏形式



b 日本落叶松节点破坏形式



c 北美云杉节点破坏形式

图2 不同规格材齿板节点破坏方式
Fig.2 Failure of different truss plate joints

2.2 极限承载力

三种规格材在 4 种构型下, 各试件的极限承载力测试结果列于表 2。

表 2 不同规格材齿板节点各构型极限承载力

Tab.2 Ultimate load carrying capacity of truss plate joints

树种	构型	极限荷载					均值
		1	2	3	4	5	
日本落叶松	AA	28.72	28.78	27.06	28.42	24.04	27.40
	AE	24.80	21.38	18.68	18.26	17.18	20.06
	EA	23.26	21.36	20.08	23.28	15.34	20.66
	EE	16.92	18.02	21.08	19.10	18.70	18.76
兴安落叶松	AA	24.96	28.12	31.92	29.94		28.74
	AE	21.42	20.18	21.02			20.87
	EA	18.56	19.04	17.20	18.02	18.00	18.16
	EE	16.64	18.96	15.14	18.16	13.04	16.39
云杉	AA	21.80	23.52	20.88	25.38	22.86	22.89
	AE	19.04	15.98	16.56	17.64	18.86	17.62
	EA	13.08	15.36	13.98	12.46	15.66	14.11
	EE	16.50	15.21	15.31	16.22		15.83

由表 2 可得, 在 4 种构型下, 两种国产落叶松齿板节点的齿极限承载力均高于北美云杉, 主要原因是两种国产材的密度及弹性模量均高于进口云杉规格材。

两种国产落叶松做比较, 荷载平行于木纹方向(AA、AE)时, 节点的破坏形式均为齿拔出, 其中兴安落叶松的密度及弹性模量更高, 其极限承载力更大; 荷载垂直于木纹方向(EA、EE)时, 兴安落叶松节点主要沿纹理方向的木材撕裂^[8], 而日本落叶松节点主要为齿拔出破坏, 部分试件在齿拔出过程带出木材。主要原因是兴安落叶松早晚材差异较大, 材质不均匀易撕裂; 而日本落叶松材质相对均匀, 不易开裂, 故后者的齿极限承载力较高。

三种规格材在 4 种构型下的齿板节点极限承载力的方差分析结果, 见表 3、4。

表 3、4 结果表明, 在 0.05 显著性水平下, 三种规格材在 AA、EA 构型中差异性显著, 其中两种落叶松齿板节点的极限承载力差异不显著。在 AA 构型中, 日本、兴安落叶松齿板节点的极限承载力, 分别比云杉高近 20%和 26%; 在 EA 构型中, 2 种落叶松齿板节点的极限承载力, 分别比云杉齿板节点高出 46%和 29%。

在 0.05 显著性水平下, 三种规格材齿板节点的极限承载力在 AE、EE 两种构型中差异不显著。

表 3 不同规格材齿板节点各构型极限承载力方差分析

Tab.3 Variance of analysis for ultimate load carrying

capacity of truss plate joints

构型	差异源	平方和	df	均方	F 值	显著性
AA	组间	87.788	2	43.894	8.918	0.005
	组内	54.144	11	4.922		
	总数	141.932	13			
AE	组间	24.493	2	12.246	2.673	0.118
	组内	45.817	10	4.582		
	总数	70.310	12			
EA	组间	109.470	2	54.735	12.530	0.001
	组内	52.420	12	4.368		
	总数	161.890	14			
EE	组间	23.024	2	11.512	3.806	0.055
	组内	33.274	11	3.025		
	总数	56.298	13			

表 4 不同规格材齿板节点各构型极限承载力多重分析

Tab.4 Multiple comparisons for ultimate load carrying

capacity of truss plate joints

树种	极限承载力/ kN			
	AA	AE	EA	EE
日本落叶松	27.40 B	20.06 A	20.66 B	18.76 A
兴安落叶松	28.74 B	20.87 A	18.16 B	16.39 A
云杉	22.89 A	17.62 A	14.11 A	15.83 A

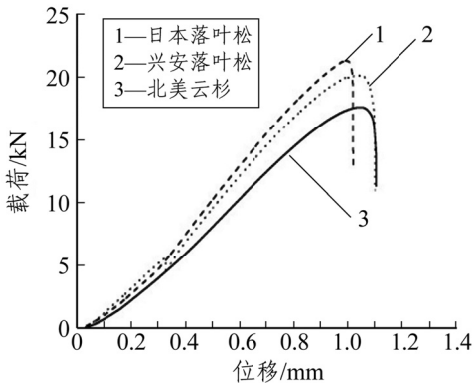
注: 同一列字母是用 T -检验方法在 0.05 水平下进行多重分析得到的结果, 其中任意 2 项含有相同字母为差异不显著, 否则为差异显著。

通过对比可以看出, AA、EA 与 AE、EE 型构件的极限承载力存在区别, 主要受齿板主轴方向与荷载方向的影响。当齿板主轴平行于荷载方向时 (AA、EA), 三种规格材节点极限承载力的差异显著性大于齿板主轴垂直于荷载方向 (AE、EE)。

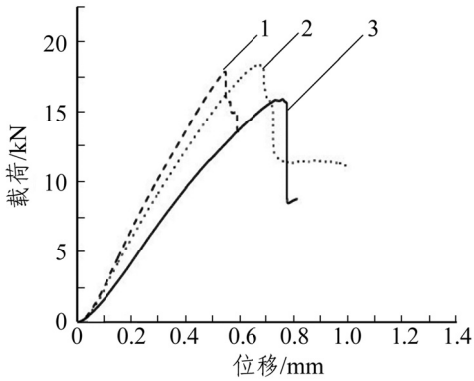
2.3 节点延性

在荷载与木纹方向不同的情况下, 三种规格材齿板节点的极限承载力差异明显, 在荷载平行、垂直于木纹时的荷载-位移曲线, 如图 3a、3b 所示。

通过对荷载位移曲线进行积分, 可得各节点的延性^[9] (表 5)。延性反映节点的抗震性能, 延性较好的节点及建筑结构在破坏前具有明显的破坏预兆, 可提供更多的逃生时间。



a 荷载平行木纹方向



b 荷载垂直木纹方向

图 3 三种规格材齿板节点荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curve of truss plate joints

表 5 三种规格材齿板节点延性对比

Tab.5 Comparison of ductility of truss plate joints

荷载方向	延性/ (kN×mm)		
	云杉	日本落叶松	兴安落叶松
顺纹	10.143	10.771	11.764
横纹	7.085	10.649	5.669

由图 3 及表 5 可知, 在荷载平行于木纹方向时, 兴安落叶松规格材齿板节点延性优于日本落叶松规格材, 而北美云杉最差; 在荷载垂直于木纹方向时, 日本落叶松规格材齿板节点延性较好, 而兴安落叶松最差。

主要原因是在荷载平行于木纹时, 三个树种齿板节点的破坏过程相似, 密度较高的规格材表现出更好的延性; 而在荷载垂直于木纹时, 兴安落叶松由于材质不均匀, 易产生撕裂破坏, 致使节点过早失去承载能力, 节点延性较差。此外, 三种规格材均表现出在顺纹情况下的齿板节点延性优于横纹, 与以往研究结果相同^[10-11]。

(下转第 39 页)

- 科技信息, 2003 (1): 344.
- [4] 盖志科. 低温热水地板辐射供暖的优点及施工要点[J]. 山西建筑, 2001, 27 (4): 129-130.
- [5] 国家林业局知识产权研究中心. 木地板锁扣技术与地采暖用木地板技术专利分析报告 2014[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015: 72-73.
- [6] 李祯. 基于碳素材料的自发热木质复合材料的电热性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 4.
- [7] 苏久强. 地热地板低温辐射采暖的施工工艺[J]. 煤炭技术, 2006, 25 (8): 100.
- [8] 刘春泽, 聂立武, 韩古月. 地板采暖工程用砖的研制及应用[J]. 辽宁建材, 2010 (7): 35-37.
- [9] H Khorasanizadeh, GA Sheikhzadeh, AA Azemati, et al. Numerical study of air flow and heat transfer in a two-dimensional enclosure with floor heating[J]. Energy & Buildings, 2014, 78 (78): 98-104.
- [10] 王波, 王友志. 低温热水地板辐射供暖方式简析[J]. 中国住宅设施, 2014 (1): 78-80.
- [11] 冀东光. 发热电缆地板辐射供暖系统的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14 (5): 272-273.
- [12] 张洋. 发热电缆在采暖系统中的应用[J]. 电器工业, 2010 (3): 54-55.
- [13] 刘春生. 电热膜的应用[J]. 家用电器, 2001 (11): 22.
- [14] 严丹. 碳纤维电热膜地板采暖初探[J]. 供热制冷, 2006 (3): 23-25.
- [15] 陈庆庆, 王俊, 吉富堂, 等. 装饰面板及地板结构对实木复合地板导热性能的影响[J]. 森林工程, 2015 (2): 84-87.
- [16] 李祯. 基于碳素材料的自发热木质复合材料的电热性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 3.
- [17] 高建忠. 电采暖地板发展现状与趋势[J]. 国际木业, 2015 (8): 4-5.
- [18] 阎泽利, 赵晓旭, 李哲瑞, 等. 小径级杉木制备内置碳纤维电热线地热地板[J]. 木材工业, 2015, 29 (4): 9-13.
- [19] 赵登科. 碳纤维电热地板热工性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [20] 王艳伟, 吴忠其, 孙伟圣, 等. 碳纤维电加热地板研究进展与展望[J]. 中国人造板, 2016 (1): 5-8.
- [21] 江涛, 张双保. 浅谈低温热水地板采暖的特点及应用前景[J]. 山东林业科技, 2009 (2): 86-87.
- [22] 王凯乐. 地暖供热的发展空间和作用[J]. 林业科技情报, 2013, 45 (3): 42-43.
- [23] 建设部. 建设事业“十一五”重点推广技术领域[Z], 2006.
- [24] 陈晖, 王姝歆. 碳纤维电地暖系统智能温控器的优化设计[J]. 测控技术, 2016, 35 (5): 149-152.
- [25] 张婧芃. 浅析定形相变储能材料在蓄热地板中的应用[J]. 城市建筑, 2012 (17): 228, 236.
- [26] 高建忠. 远红外线发热地板发展与未来[C]//全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集, 2015.
- [27] 叶红, 代平国, 任彦回. 地暖环境条件下木地板甲醛释放量测定及收集装置[J]. 福建分析测试, 2012 (6): 55-57.
- [28] J Seo, J Jeon, JH Lee, et al. Thermal performance analysis according to wood flooring structure for energy conservation in radiant floor heating systems[J]. Energy & Buildings, 2011, 43 (8): 2039-2042.
- [29] 王武康, 陈曦曦, 王国琴, 等. 地暖环境下地板甲醛释放特征研究[J]. 林产工业, 2016 (9): 49-51.
- (责任编辑 向 琴)

(上接第13页)

3 结论

1) 三种规格材齿板节点的破坏形式类似, 在荷载垂直于木材纹理时, 兴安落叶松齿板节点易发生木材撕裂破坏, 从而导致节点极限承载力及延性较低, 在实际应用中应予以避免。

2) 在四种节点构型中, 两种国产落叶松齿板节点的极限承载力均高于进口云杉规格材。

3) 在荷载平行于木纹方向时, 兴安落叶松节点延性最高, 进口云杉节点延性最低; 在荷载垂直于木纹方向时, 日本落叶松齿板节点延性最高, 兴安落叶松节点延性最低。三种规格材在顺纹方向的齿板节点延性, 均大于横纹方向。

4) 国产落叶松在齿板节点中具有较好的拉伸性能, 但本文仅局限于齿板节点, 尚未考虑整体木桁架的承载性能, 今后有待进一步研究其在轻型木桁架中的整体承载性能, 为国产结构材的开发应用, 提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王滋, 王丽, 张赛男, 等. 轻型木桁架的研究现状和发展趋势[J]. 林产工业, 2016, 43 (2): 1-7.
- [2] 贺绍均, 杨保锦, 闫薇, 等. 轻型木结构齿板压入试验及影响因子研究[J]. 木材加工机械, 2016, 27 (1): 43-47.
- [3] 姜福来, 于辉. 落叶松木材利用途径的探讨[J]. 林业科技, 2000, 25 (2): 53-56.
- [4] 徐守乐. 落叶松的开发及应用[J]. 中国林业产业, 2004 (2): 57-58.
- [5] 周贤武, 张俊珍, 周海宾, 等. 树龄对日本落叶松木材物理力学性质的影响[J]. 林业科技开发, 2014, 28 (4): 54-57.
- [6] 王丽, 王滋, 丁青峰, 等. 三种国产齿板的节点拉伸性能分析[J]. 木材工业, 2016, 30 (5): 5-8, 16.
- [7] 席佳, 赵荣军, 费本华, 等. 兴安落叶松规格材齿板连接节点的拉伸性能[J]. 木材工业, 2009, 23 (5): 1-4.
- [8] 杨阳, 谢宝元, 费本华, 等. 三种木材齿板连接力学性能对比实验研究[J]. 木材加工机械, 2013, 24 (3): 17-21.
- [9] 席佳. 兴安落叶松规格材与齿板接合节点拉伸性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [10] 陈佛喜, 李爽, 王焕, 等. 轻型木桁架齿板的承载性能分析[J]. 木材工业, 2009, 23 (6): 14-17.
- [11] 何桂荣, 何敏娟, 倪俊, 等. 国产正交主轴齿板连接节点各项承载力性能研究[J]. 力学季刊, 2010, 31 (2): 282-287.

(责任编辑 向 琴)