

三种国产齿板的节点拉伸性能分析

王丽¹, 王滋¹, 丁青锋², 吴勇², 钟永¹, 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: 为完善国内轻型木结构体系, 开发推广国产齿板的应用, 对三种国产齿板连接节点的极限承载力、单齿承载力、临界滑移刚度、破坏形式以及拉伸过程应变进行了研究。结果表明: 国产齿板的延性优于进口齿板, 且国产齿板刻痕齿板的单齿承载力高于进口齿板; 板齿刻痕及边缘齿加长, 可提高齿板节点的连接性能。

关键词: 国产齿板; 齿刻痕; 边缘齿加长; 极限承载力; 破坏形式; 轻型木结构

中图分类号: TS63; TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2016) 05-0005-04

Tensile Properties of Three Types of Domestic Truss Plate Joints

WANG Li¹, WANG Zi¹, DING Qing-feng², WU Yong¹, ZHONG Yong¹, ZHAO Rong-jun¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry (CAF); Research Institute of Forestry New Technology, CAF; Beijing 100091, China; 2. Suzhou Crownhomes Limited Company, Suzhou 215100, China)

Abstract: In order to promote application of domestic truss plate used for light frame wood construction, the authors selected three types of domestic truss plates and an imported truss plate as control to evaluate their ultimate bearing capacity, critical slip stiffness, failure forms, ductility and stress-strain changes in tensile process. The results showed that the ductility of the three domestic truss plates was all superior to the control and that the domestic truss plates with indentation showed the best single-tooth bearing capacity. Indentation or extension fringe tooth could improve connection performance of truss plates.

Key words: domestic truss plate; indentation; extension fringe tooth; ultimate bearing capacity; failure modes; light frame wood construction

作为轻型木结构桁架连接的最主要方式, 齿板连接因施工效率高、节点性能稳定可靠、制作简单等优势而被广泛应用^[1]。目前, 国内轻型木结构选用的齿板主要采用澳大利亚进口的 M20 齿板, 其强度

较高, 节点连接性能较稳定, 但成本亦较高。国内学者在大量试验研究的基础上, 依据试验过程中出现的齿拔出、齿板断裂等破坏现象, 自主研发了齿刻痕、边缘齿加长等多种国产齿板^[2]。

本研究选用普通、齿刻痕、边缘齿加长三种国产齿板, 同时以进口 M20 齿板为对照, 通过对比分析四种齿板与日本落叶松连接节点的抗拉极限承载力、单齿极限承载力、临界滑移刚度、延性、破坏形式以及齿板不同部位应变变化等, 分析国产齿板的优缺点, 并提出改进方案, 为国产齿板的推广应用提供依据。

收稿日期: 2016-05-09; 修改日期: 2016-07-11

基金项目: 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); “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)。

作者简介: 王丽(1990—), 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。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 采自辽宁清原, 锯材尺寸 38 mm×89 mm×4 000 mm, 含水率 12%。采用机械分等法对其进行分等, 根据 GB 50005-2003 《木结构设计规范》要求, 选用 M30 等级规格材, 避开节疤开裂等缺陷, 制备的试件规格为 38 mm×89 mm×300 mm。

2) 齿板

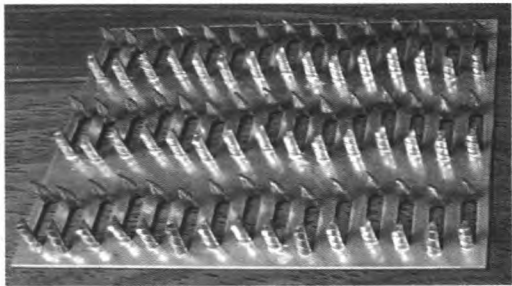
进口齿板: Mitek 公司生产, 采用镀锌钢制造。

国产齿板: 辽宁某厂生产, 采用 Q235 碳素结构钢制造。其中:

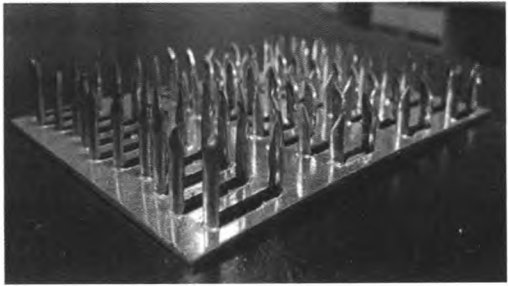
① 普通齿板, 参照进口齿板制成;

② 齿刻痕齿板, 在普通齿板的基础上, 在位于板齿高度的 1/3、1/2、2/3 处平行刻痕, 刻痕深度为板齿厚度的 30% 左右, 刻痕宽度 ≤ 0.5 mm, 刻痕长度方向与板齿高度垂直方向成 45° 夹角 (图 1a);

③ 边缘齿加长齿板, 将边缘两列板齿的长度加长, 冲孔长度由 12 mm 增加到 15 mm (图 1b) [2]。



a 国产齿刻痕齿板



b 国产边缘齿加长齿板

图 1 两种新型国产齿板

Fig.1 Two types of new domestic truss plates

3) 应变片 选自 BX120-3AA 胶基应变片, 浙江某公司生产。基底尺寸为 7 mm×4 mm, 敏感栅尺寸为 3 mm×2 mm, 电阻值为 (120.1±0.1) Ω, 灵敏系数 2.08±1%。

1.2 试验装置

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

1.3 试验方法

1) 连接试件制备: 采用平压的方式, 将齿板压入规格材。节点构造形式采用荷载平行于木纹和齿板主轴方向, 每种构型制作 5 个试件 [3]。

为方便装配夹具, 在试件两侧距端头 90 mm 处钻孔, 孔径为 18 mm。

2) 试件含水率调节: 将试件放入温度 20 °C、相对湿度 65% 的恒温恒湿箱平衡一周, 以释放齿板压制过程产生的应力, 并平衡试件含水率。

3) 应变片粘贴: 经过粗砂、细砂、清洁、涂胶、粘贴等步骤, 将应变片粘贴在试件上, 然后放入恒温恒湿箱平衡固化 2 h [4] (恒温恒湿箱条件同上)。

应变片在齿板上的分布, 如图 2 所示。

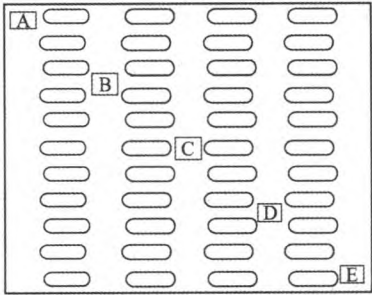


图 2 应变片在齿板上的分布

Fig.2 Distribution of strain gages in truss plates

4) 节点拉伸试验: 根据 GB 50005-2003 《木结构设计规范》附录 M 要求, 设置加载速度为 1.0 mm/min, 以保证在 5~20 min 内试件达到极限承载力, 至试件破坏则试验停止 [5]。

利用位移引伸计, 记录节点连接处位移变化 [6]; 通过应变片, 采集拉伸过程齿板各部位的应变变化数据。

2 结果与分析

2.1 节点连接性能对比分析

分别进行四种齿板与落叶松构成节点的极限承载力的统计分析, 结果列于表 1、2。

由表 1、2 结果可知, 在 0.05 显著性水平下, 不同齿板的极限承载力存在极显著差异, 以进口齿板节点的极限承载力最大, 分别是国产齿刻痕齿板、边缘

表 1 齿板与规格材节点连接性能

Tab.1 Connection properties of dimension lumber jointed with four types of truss plates

齿板类型	极限承载力/kN	临界滑移刚度/(kN·mm ⁻¹)
进口 M20	28.972	30.358
国产普通	20.334	27.253
国产齿刻痕	27.404	27.755
国产边缘齿加长	21.300	27.368

注：极限承载力和临界滑移刚度均为每组试件试验值的算术平均值。

表 2 齿板与规格材节点极限承载力的方差分析

Tab.2 Variance analysis of ultimate bearing capacity of dimension lumber jointed with four types of truss plates

差异源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
组间	280.138	3	93.379	32.989	4.397×10 ⁻⁷
组内	45.289	16	2.831		
总数	325.427	19			

齿加长齿板、普通齿板的 1.06、1.36、1.42 倍；在三种国产齿板中，以齿刻痕齿板的极限承载力最高，比普通、边缘齿加长齿板分别提高 34.77%和 4.75%。

4 种齿板连接规格材节点的临界滑移刚度，亦以进口 M20 齿板最大，分别是国产齿刻痕齿板、边缘齿加长齿板、普通齿板的 1.09、1.11、1.11 倍；三种国产齿板差别不大，以齿刻痕齿板略高，较普通齿板、边缘齿加长齿板分别提高了 1.84%、0.42%。

由于进口齿板与国产齿板的齿板尺寸与齿密度均存在差异，故对各种齿板的单齿极限承载力进行计算分析，结果列于表 3。

表 3、齿板连接规格材单齿极限承载力

Tab.3 Single tooth bearing capacity of dimension lumber jointed with four types of truss plates

齿板种类	齿板尺寸/ mm×mm	齿数/ 个	单齿极限承载力/ kN
进口 M20	75×100	96	0.301
国产普通	77×103	88	0.231
国产齿刻痕	76×105	88	0.311
国产边缘齿加长	80×105	88	0.242

表 3 结果显示，国产齿刻痕齿板的单齿极限承载力最高，表明板齿刻痕对于增加板齿与木材之间的摩擦力和机械咬合力起到一定作用；国产边缘齿加长齿板的单齿极限承载力，亦高于普通齿板 1.05 倍。说明边缘齿加长，有助于提高齿板的抗拔能力。

2.2 节点破坏形式及延性对比分析

破坏形式是齿板与木材接合能力的直观表现。进口 M20 齿板连接节点的主要破坏形式是齿拔出，且伴随木材撕裂现象（图 3a）；国产齿刻痕齿板节点的主要破坏形式是齿根断裂（图 3b）；国产普通齿板和边缘齿加长齿板节点主要破坏为齿拔出（图 3c）。



a M20 齿拔出



b 齿根断裂

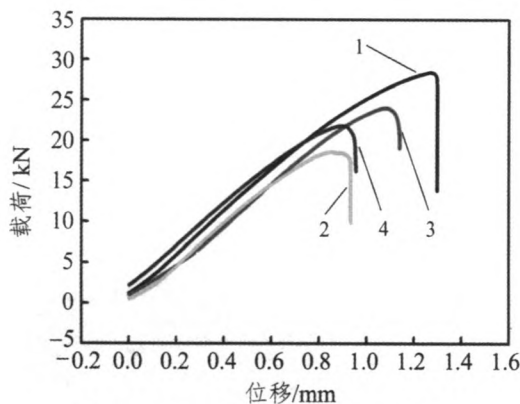


c 齿拔出

图 3 齿板连接节点破坏形式

Fig.3 Failure modes of truss plate joints

图 4 为四种齿板的荷载-位移曲线图。为更直观地比较四种齿板在达到最大荷载后的延性，对其荷载-位移曲线进行峰值区域面积计算。其中峰值区域位移，指齿板节点荷载-位移曲线上上升段 $0.9 F_{\max}$ ($F_{\max}$ 指极限荷载) 处至下降段 $0.9 F_{\max}$ 处的位移变化，表示齿板节点所能经受的变形量；峰值区域面积，指对齿板节点荷载-位移曲线上上升段 $0.9 F_{\max}$ 到下降段 $0.9 F_{\max}$ 区间的面积进行积分，表示齿板节点所吸收的能量^[7]。结果列于表 4。



注：1—进口M20齿板；2—国产普通齿板；
3—国产刻痕齿板；4—边缘齿加长齿板。

图 4 齿板与规格材节点荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of truss plate joints

表 4 齿板与规格材节点峰值区域面积比较

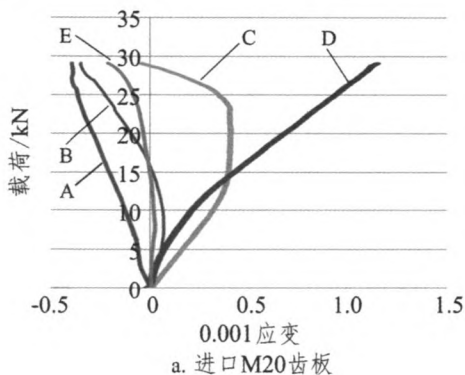
Tab.4 Comparison of peak area of four types
of truss plates

齿板种类	峰值区域位移 /mm	峰值区域面积 /(kN×mm)
进口 M20	0.224	4.096
国产普通	0.232	5.375
国产齿刻痕	0.227	4.700
国产边缘齿加长	0.271	7.404

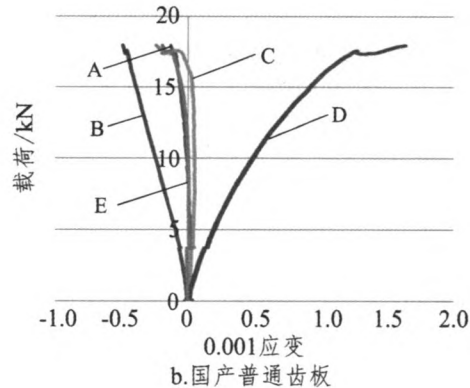
由表 4 结果可知，在节点承载力没有明显下降情况下，国产边缘齿加长齿板、齿刻痕齿板和普通齿板，其节点经受的变形量，分别是进口齿板的 1.21、1.01 和 1.04 倍；吸收的能量，分别是进口齿板节点的 1.81、1.15 和 1.31 倍。表明三种国产齿板的延性均优于进口齿板。

2.3 节点拉伸过程应力变化及分布

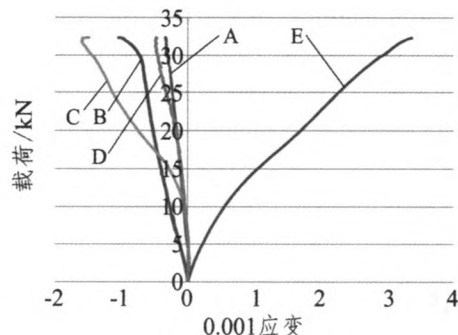
在拉伸过程，齿板主要受拉力作用。4 种齿板的不同位置（图 2 所示 A、B、C、D、E）与规格材节点的拉伸应变，分别如图 5a~d 所示。



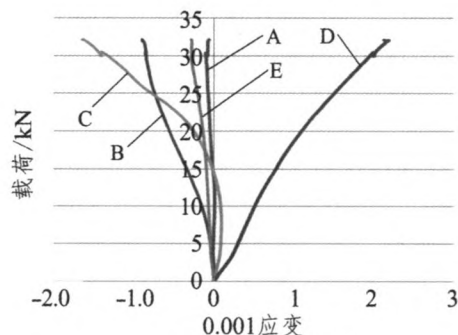
a. 进口 M20 齿板



b. 国产普通齿板



c. 国产齿刻痕齿板



d. 国产齿加长齿板

图 5 四种齿板节点的应变变化

Fig.5 Strain variation of four types of truss plates

在拉伸过程中，三种国产齿板与规格材连接节点应变变化趋势相似。在拉伸初始阶段，距离齿板中心线最近的两个齿槽边缘 B、D 点产生的应变最大，其应力最大，与有限元法分析结果一致^[8]；

随着荷载增大，齿板开始拔出，C 处钢板发生弯曲变形，此处所受应力由拉伸应力变为压缩应力。由于国产普通齿板抗拔能力较低，齿板在屈服点后迅速被拔出，节点达到极限荷载；国产齿刻痕齿板和国产边缘齿加长齿板由于增加了板齿与木材间的摩擦，提高了板齿的抗拔能力，使得齿拔出过程较为缓慢，C 处应变随着在荷载增加而增大；A、E 点在拉伸过程受到的拉伸应力增加缓慢，变化较小。

（下转第 16 页）

[2] Watanabe U, Imamura Y, Iida I. Liquid penetration of precompressed wood VI: Anatomical characterization of pit fractures [J]. Journal of Wood Science, 1998, 44(2): 158-162.

[3] 赵雪, 孙耀星, 刘君良, 等. 辊压浸注浸渍树脂致木材力学性质变异 [J]. 林产工业, 2014, 41(1): 23-27.

[4] Adachi K, Inoue M, Kanayama K, et al. Liquid impregnation of dry wood using a roller-pressing method, 1: Effect of transverse compressive deformation on liquid impregnation [J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(6): 479-483.

[5] Adachi K, Inoue M, Kawai S. Liquid impregnation into dry wood using a roller-pressing method, 2: Effect of specimen size and processing variables on amount of water impregnation [J]. Mokuzai Gakkaishi, 2004, 50(4): 243-247.

[6] Adachi K, Inoue M, Kawai S. Liquid impregnation of green wood using a roller-pressing method [J]. Mokuzai Gakkaishi, 2005, 51(3): 159-165.

[7] 孙耀星, 刘一星. 辊压浸注处理大青杨木材的浸注深度 [J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(11): 32-33.

[8] 吴玉章. 辊压预处理改善树脂浸注的均匀性 [J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(1): 23-24.

[9] Keckes J, Burgert I, Frühmann K, et al. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood [J]. Nature Materials, 2003, 2(12): 810-813.

[10] 王智慧. 木材干燥及浸注的压缩预处理研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.

[11] 江贵军. 木材辊压浸注技术的应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.

[12] 高艳, 吴永红, 张成岗. 整合平均光密度和面积比两种参数用于显微图像定量分析的初步研究 [J]. 军事医学科学院院刊, 2009, 33(5): 405-408.

[13] Bao F, Lu J, Zhao Y. Effect of bordered pit torus position on permeability in Chinese yezo spruce [J]. Wood and Fiber Science, 2007, 33(2): 193-199.

[14] 于洪亮. 电子显微观察下木材染色机理的对比性研究 [J]. 林业实用技术, 2014 (1): 62-63.

[15] 赵广杰, 赵广凤. 木材中染料水溶液的渗透过程 [J]. 东北林业大学学报, 1993, 21(5): 54-59.

(责任编辑 向琴、劳万里)

(上接第8页)

进口 M20 齿板与规格材连接节点, 在拉伸初始阶段, 距离齿板中心线最近 C 和最边缘齿板 E, 产生的应变最大, 其所受应力最大; 随着荷载增加, 距离齿板中心线最近的两个齿槽边缘 B、D 点的应变增大; 当达到钢板的屈服强度, C 处发生屈服, 连接节点开始发生齿拔出, 为抵抗齿拔出, 位于下齿板 E 点应变增加, 直至齿板完全拔出。

图 5 结果表明, 进口齿板的屈服强度高于国产齿板; 国产齿板中, 齿刻痕齿板和边缘齿加长齿板的抗拔能力高于普通齿板。

3 结论

1) 进口 M20 齿板的极限承载力、临界滑移刚度均高于三种国产齿板, 但国产齿刻痕齿板的单齿承载力比进口齿板高, 三种国产齿板的延性均优于进口齿板。

2) 三种国产齿板中, 国产齿刻痕齿板和边缘齿加长齿板的极限承载力, 较普通齿板分别提高了 34.77%、4.75%, 其单齿承载力分别是国产普通齿板

单齿承载力的 1.35、1.05 倍。板齿刻痕和边缘齿加长, 可提高齿板节点的拉伸承载力。

3) 齿板节点拉伸过程中, 进口齿板的屈服强度高于国产齿板, 距离齿板中心线最近处产生的应变最大。因此, 可通过增加连接节点接缝处的齿板强度等措施, 以提高齿板节点的连接性能。

参考文献:

[1] 郭伟, 费本华, 陈恩灵, 等. 我国木结构建筑行业发展现状分析 [J]. 木材工业, 2009, 23 (2): 19-22.

[2] 叶虹, 谢宝元, 费本华. 国产木桁架齿板连接件的研发 [J]. 林业科学, 2012, 48 (1): 148-153.

[3] GB 50329-2002, 木结构试验方法标准 [S].

[4] 丁梓涵, 赵其华, 彭社琴, 等. 光纤和电阻应变片在结构变形测试中的对比试验研究 [J]. 传感技术学报, 2015, 28 (8): 1149-1154.

[5] GB 50005-2003, 木结构设计规范 [S].

[6] 况宜. 轻型木桁架齿板连接节点受力性能的试验研究 [D]. 重庆大学, 2011.

[7] 叶虹. 国产落叶松齿板连接节点拉伸性能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

[8] 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.

(责任编辑 向琴)

投稿、订阅请登录: mcgy.criwi.org.cn 微信公众号: mucaigongye