

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020074

齿榫类型及参数对指接竹规格材性能的影响

刘焕荣¹, 杨晓梦^{1,2}, 苏勤¹, 黄爱月¹, 费本华¹, 张秀标¹

(1. 国际竹藤中心; 国家林草局竹藤科学重点实验室, 北京 100102; 2. 宁波大学; 浙江宁波 315211)



摘要: 以竹规格材为研究对象, 分别探讨指榫类型(垂直型和水平型)、齿榫参数(I、II、III型齿榫)和嵌合度(0、0.1、0.3 mm)等参数对指接竹规格材性能的影响, 结果显示垂直型指榫指接竹规格材的力学性能优于水平型指榫; 当嵌合度为0.1 mm, 采用垂直II型齿榫指接竹规格材的性能最优, 与未指接竹规格材相比, 指接竹规格材较好地保持了竹材的抗弯和抗拉性能, 其抗弯性能和抗拉强度分别满足GB/T 26899—2011《结构用集成材》中机械分等层板力学性能M_E16级和最高级M_E18的要求, 具备作为结构材的潜力。

关键词: 竹展平板; 指榫类型; 齿榫参数; 竹规格材; 指接; 力学性能

中图分类号: TS653; S795.9; S781.9

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0047-06

Effects of Toothed Tenon Types and Parameters on Properties of Finger-Jointed Dimensional Bamboo Lumber

LIU Huan-rong¹, YANG Xiao-meng^{1,2}, SU Qin¹, HUANG Ai-yue¹, FEI Ben-hua¹, ZHANG Xiu-biao¹

(1. International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology, National Forestry and Grassland Administration (NFGA), Beijing 100102, China; 2. Ningbo University, Ningbo, 315211 Zhejiang, China)

Abstract: In the present study, effects of finger joint parameters including finger types, finger tenon parameters (type I, II, and III), and fitness ratios on the performance of finger-jointed dimensional bamboo lumber were explored respectively. Results indicated that the mechanical properties of finger-jointed dimensional bamboo lumber in the verticality (V) finger tenon were better than that with the horizontal (H) tenon. In the V finger tenon, type II with 0.1 mm fitness ratio was the best finger joint parameter for dimensional bamboo lumber. Compared with the performance of non-finger-jointed dimensional bamboo lumber, bending and tensile properties of finger-jointed dimensional bamboo lumber performed well, which met the physical property requirements of machine-graded panels of M_E16 grade and the highest grade of M_E18 in GB/T 26899—2011. In conclusion, finger-jointed dimensional bamboo lumber has a good application potential in structural materials.

Key words: bamboo flattened sheet; finger joint types; toothed tenon parameters; dimensional bamboo lumber; finger-joint; mechanical properties

规格材是具有一定宽度和高度尺寸的截面规格

化木材, 是胶合木连续化、自动化制备的基本单元^[1]。竹集成材是以尺寸规格的竹片为单元制备而成, 由于单元尺寸小导致组坯自动化程度低; 以尺寸较大的竹展平板为单元, 可提高自动化生产水平, 但竹展平板在不同温湿度条件下会出现翘曲、变形。将一定尺寸规格的竹展平板两两组坯胶合, 可得到

收稿日期: 2020-05-08; 修改日期: 2020-05-29

基金项目: 国家重点研发计划课题“竹质家具用材连续化成套制造技术集成示范”(2016YFD0600905)。

作者简介: 刘焕荣(1982—), 女, 副研究员。Email: liuhuanrong@icbr.ac.cn

通讯作者: 张秀标, 男, 副研究员。Email: zhangxb@icbr.ac.cn

尺寸稳定、截面尺寸规格化的竹规格材, 将其作为竹集成材的制备单元, 可提高生产的自动化水平。然而, 受竹材中空壁薄以及尖削度影响, 目前竹展平板长度大多在1 m左右^[2], 对其进行接长可使材料的长度不受限制, 是提高材料利用率、附加值和拓宽竹规格材在建筑和家具等领域应用的关键。

木/竹材接长处理包括指接、斜接、搭接、对接等多种方法。相对而言, 指接材具有较高的木材强度保留率, 是材料接长的常用方法^[3-4]。一般来说, 垂直指接材指接处的抗拉强度高于水平指接材^[5], 齿榫长度、齿榫斜率以及嵌合度等因素均不同程度地影响指接材料的性能^[6-9]。

竹材密度较大, 指榫类型、长度和嵌合度等因素决定了梳齿的难度和指接的端部压力以及指接材的强度, 目前仅有竹材原态多方重组材单元的指接参数研究^[10-11]。鉴于此, 笔者以无刻痕竹展平板胶合而成的竹规格材为研究对象, 探讨齿榫类型、嵌合度和齿榫参数等因素对指接竹规格材性能的影响, 并与未指接竹规格材的性能进行对比, 以期竹规格材制备工艺参数的优化提供数据支撑, 为拓宽竹材的应用领域奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 毛竹 (*Phyllostachys edulis*): 浙江省新昌县4年生, 平均胸径12 cm, 采伐后一周之内的鲜竹材, 含水率 $\geq 40\%$ 。

2) 间苯二酚指接胶黏剂: 主剂: 交联剂=100:15 (质量比)。购自上海致新材料科技有限公司。

1.2 试验设备

指榫开榫机, 青岛郎氏豪脉MX3510梳齿榫开榫机; 指接刀 (型号规格为4.0 $\times$ 160-4和6.0 $\times$ 160-4); MH1525型指接机; Inston 5582万能力学实验机。

1.3 试验方法

1.3.1 指接竹材的制备

1) 无刻痕竹展平板加工: 利用专用^[12]竹展平设备加工竹展平板, 规格尺寸760 mm (长) $\times$ 60 mm (宽) $\times$ 8 mm (厚), 干燥平衡后含水率保持在8%~10%。

2) 竹规格材胶合: 为了消除材料自身的差异, 挑选密度相差 ≤ 0.02 g/cm³的竹展平板, 通过竹黄-竹黄组坯 (图1), 脲醛树脂涂胶量为210 g/m², 在热

压压力2 MPa、热压时间10 min的条件下, 热压胶合裁边制成尺寸为760 mm (长) $\times$ 50 mm (宽) $\times$ 15 mm (厚)的竹规格材; 在温度23~28 ℃、相对湿度55%~65%的环境中养生1个月, 目标含水率控制在12%左右。

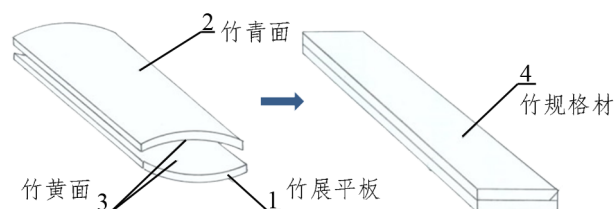


图1 竹规格材及其组坯方式示意图

Fig.1 The schematic diagram of dimensional bamboo lumber

3) 竹规格材指接: 指接竹规格材采用手工涂胶, 指榫处涂胶量为290 g/m², 端压3 MPa, 保压时间4 h, 陈放24 h后备用。

1.3.2 试验设计

1) 指榫类型对比 在嵌合度 (齿顶宽与齿底宽之差, 取正值) 统一选用0.1 mm的条件下, 对比竹规格材垂直型 (V型) 和水平型 (H型) (图2) 指榫指接材的性能, 每种指榫类型选择三种齿榫参数 (图3和表1), 每组重复试样6个。

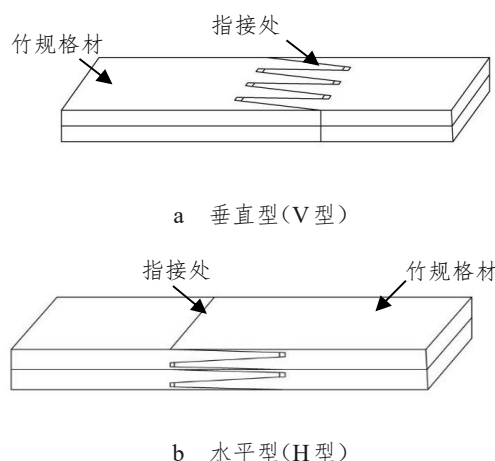


图2 两种指榫类型示意图

Fig.2 The schematic diagrams of two finger-joints

2) 齿榫参数对比 根据预试验结果, 选择垂直型指接方式, 固定嵌合度为0.1 mm; 结合竹规格材质地较硬的特性以及以往的研究结果^[10-14], 研究I、II、III三种齿榫参数 (图3和表1) 对指接竹规格材性能的影响, 每组试验重复试样6个。

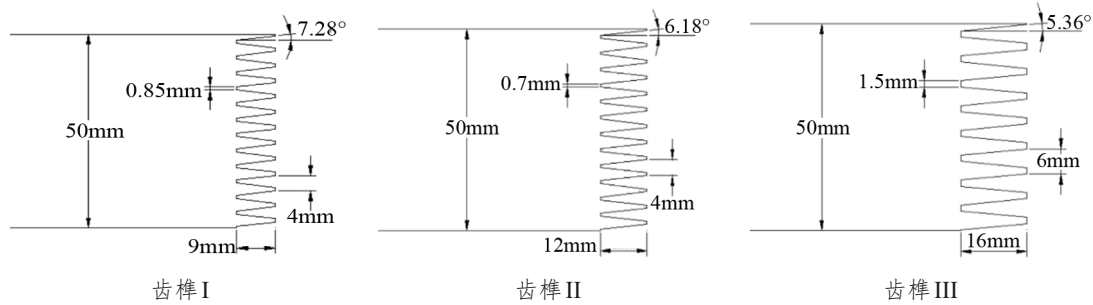


图3 垂直型和水平型指榫的三种齿榫类型及参数

Fig.3 The schematic diagrams of three toothed tenon types and parameters of V-finger and H-finger

表1 指接刀规格尺寸

Tab.1 Specifications of three types of finger-joint knives

齿榫 类型	宽距比	名称	厚度/ mm	齿顶/ mm	齿长/ mm	侧齿/ mm	斜面 高	斜度
I	0.2125	中刀	4	0.85	9	0.425	1.15	1/7.8261
		底刀	10	6.85	9	0.425	1.15	1/7.8261
II	0.175	中刀	4	0.7	12	0.35	1.30	1/9.2308
		底刀	10	6.7	12	0.35	1.30	1/9.2308
III	0.250	中刀	6	1.5	16	0.75	1.50	1/10.6667
		底刀	10.5	6.0	16	0.75	1.50	1/10.6667

3) 嵌合度对比 根据以往研究得出的较优嵌合度范围 (0.12~0.2 mm) [14-15], 在齿榫参数统一为垂直型指榫 II 型的条件下, 分析 0、0.1、0.3 mm 三种嵌合度时指接竹规格材的性能, 每组试样重复 6 个。

1.4 性能测试

1) 抗弯性能: 参照 GB/T 26899—2011《结构用集成材》进行测试, 跨厚比为 21, 以 10 mm/min 加载速度匀速加载至破坏, 加载时保证竹规格材指接部位位于两加载点的中央。

2) 抗拉性能: 参照 ASTM-D 143 “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”进行测试, 尺寸为 370 mm (长)×20 mm (宽)×15 mm (厚), 矩形截面; 为确保未指接材有效拉伸破坏, 未指接竹规格材拉伸区域宽度调整为 10 mm, 沿试样的顺纹方向均匀拉伸至破坏, 根据最大破坏载荷和断裂面面积得出拉伸强度。

3) 冲击性能: 参照 GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》进行一次性冲击破坏试验, 尺寸 300 mm (长)×25 mm (宽)×15 mm (厚), 跨距为 240 mm, 对比分析指接和未指接竹规格材的冲击韧性和破坏模式。

2 结果与分析

2.1 指榫类型对接接竹规格材性能的影响

指榫类型对接接竹规格材力学性能的影响结果, 如图 4 所示。

图 4 显示, 在三种齿榫参数条件下, 均以垂直型指榫的抗弯强度、弹性模量、拉伸强度和冲击韧性高于水平型指榫。选择试件截面尺寸 50 mm×15 mm 为例, 垂直型指榫的完整齿榫数和胶接面积均大于水平型指榫 (表 2)。

表2 不同指榫类型的完整齿数和胶接面积

Tab.2 The complete tenon numbers and adhesive areas of jointed dimensional bamboo lumber in different finger types

齿榫	完整齿榫数/个		胶接面积/cm ²	
	垂直型	水平型	垂直型	水平型
齿榫I	12	3	37.20	34.77
齿榫II	12	3	47.88	45.01
齿榫III	8	2	44.73	44.00
平均	—	—	43.27	41.26

当胶接强度达到足以抵抗受力过程中胶缝产生的剪切作用时, 指接材强度主要由同截面内齿顶宽累积量决定。与水平型指榫指接材相比, 垂直型指接材的完整齿榫数较多, 齿顶宽度累积量显著高于水平型指榫, 且指肩面积较小, 而指肩的接合相当于端接, 垂直型指榫指接材进一步提高了指接强度[13-14]。

除了上述胶接面积不同外, 竹材与木材相比材质密实, 不利于胶黏剂渗透, 且竹青到竹黄材性的梯度变异, 易导致水平型指榫在竹青和竹黄间的榫槽不均; 另外, 相同端压条件下, 垂直型指榫更易于指榫充分结合。因此, 对于完整齿数较多、齿顶宽度累积量较大且指肩面积较小的垂直型指榫的竹规格指接材强度优于水平型指接材。

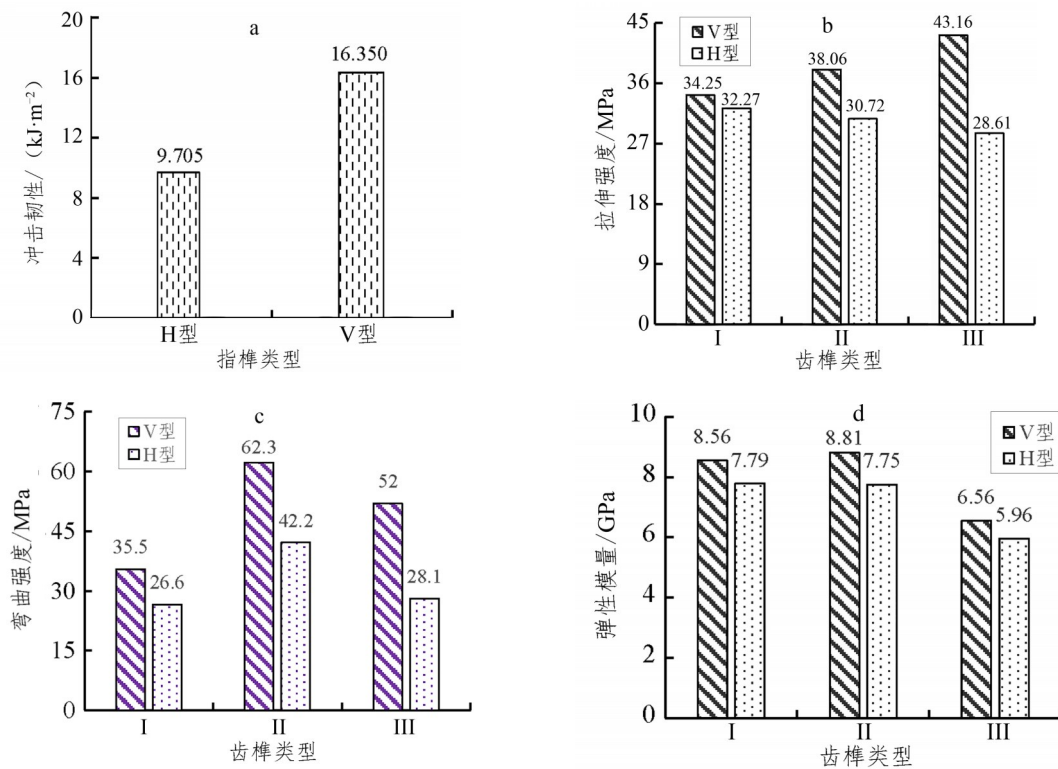


图4 不同指榫类型指接竹规格材的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of finger-jointed dimensional bamboo lumber in different finger tenons

此外,结合两种指榫类型的特点,水平型指榫在加工时以试件厚度方向为基准,要求材料在加工时厚度误差小,否则会增加材料后期的刨削量,但铣齿过程中发现,由于竹规格材厚度方向的密度不均一,指榫根部在加工时容易受到影响,难以保证中部的指榫精确度,加工误差偏大。垂直型指榫加工精度较高,可减少后续表面刨铣量。

因此综合考虑力学强度和加工条件,竹规格材的垂直型指榫接长方式更有优势。后续研究齿榫参数和嵌合度对指接竹规格材性能的影响时,均选择垂直型指榫接长方式。

2.2 齿榫参数对指接竹规格材性能的影响

垂直型指榫接长齿榫参数对指接竹规格抗弯性能的影响结果如图4c、d所示,对抗弯性能的方差分析结果见表3。

如图4c显示,II型齿榫(指长12 mm)指接竹规格材抗弯强度最高(61.25 MPa),齿榫I(指长9 mm)的最低,这可能与三种齿榫的宽距比(齿顶宽:齿距)(表1)以及胶接面积(表2)不同有很大关系。

表3 三种齿榫参数的指接竹规格材的MOR和MOE方差分析

Tab.3 MOR and MOE variance analysis of finger-jointed dimension bamboo lumber in three toothed tenon types

性能	差异源	平方和	自由度	均方和	F	P值	显著性
MOE	I & II	3.498	1	3.498	0.824	0.377	-
	II & III	1.701	1	1.701	0.275	0.606	-
	I & III	10.032	1	10.032	2.243	0.152	-
	组间	10.034	2	5.017	0.995	0.383	-
MOR	I & II	1650.479	1	1650.479	5.149	0.037	*
	II & III	4.438	1	4.438	0.016	0.899	-
	I & III	1619.553	1	1619.553	7.655	0.013	*
	组间	791.722	2	395.861	1.563	0.229	-

齿榫参数中的宽距比(齿顶宽:齿距)可间接反映结合部分的有效胶接面积,其值越小,齿顶宽越小,胶接面积则越大,指接强度就越高^[15]。这与表1中齿榫II的宽距比最小相一致;另外,本试验中齿榫II的宽距比为0.175,介于日本常用的结构材优化齿榫参数的宽距范围内(0.13~0.2)^[16],因此,齿榫II较适合竹规格材指接。

III型齿榫(指长16 mm)钝的齿顶之间呈对接,不能有效传递应力,齿顶断面陡然变化时引起应力

集中，导致材料在低载荷时便发生破坏^[17]。后期观察材料的破坏形式发现，I 型齿榫指接竹规格材沿胶层发生破坏，可能是由于加工精度的原因，导致胶层厚度过大，进一步影响胶合强度^[18]。

加拿大工程木制品行业使用的指长范围是 22~29 mm^[17]，然而竹材结构密实和性能的径向梯度变异，若选用过长的齿榫指接，指榫的加工精度和均一性会受到影响；另外，在保证强度的情况下，指长直接影响成本^[19]。因此综合考虑指榫的加工精度和成本，建议选择竹规格材的垂直型指榫长度为 12 mm（II 型齿榫）。

表 3 显示，齿榫参数对接接竹规格材抗弯弹性模量影响不显著；而齿榫 I 和 II、I 和 III 之间的抗弯强度有显著差异。因为弹性模量主要与材料本身的性质有关，而抗弯强度除了与指接材本身的性质有关外，还与齿榫参数相关。

2.3 嵌合度对接接竹规格材性能的影响

嵌合度对接接竹规格材抗弯性能的影响结果，如图 5 所示；对抗弯性能的分差分析结果见表 4。

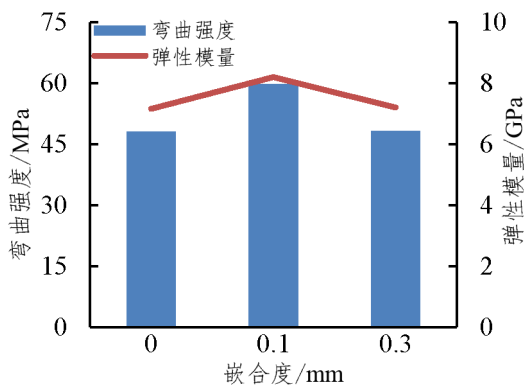


图 5 不同嵌合度的指接竹规格材的抗弯强度
Fig.5 The bending properties of jointed dimensional bamboo lumber in different fitness ratios

图 5 和表 4 显示，当嵌合度为 0.1 mm 时，指接竹规格材的 MOR、MOE 最大；但嵌合度对接接竹规格材的 MOR、MOE 影响不显著。

在嵌合度较小时，测试的试件偶尔会出现界面破坏的现象。由于竹材没有横向疏导组织，胶黏剂较难渗透，因此，在嵌合度为 0 mm 时，齿榫结合较松，作用在齿榫斜面上的胶合压力小，不能形成良好的胶合界面，加载时易在指接部位产生破坏。当嵌合度为 0.3 mm 时，指榫底部产生裂隙，钝的指端呈对接，不能有效地传递应力，而指榫顶端的陡然

变化也会引起应力集中，导致指接材在较低载荷下就发生破坏；而且在压力解除后，由于竹材自身的弹性，使齿榫部分回弹，同样导致指接强度降低^[15]。综合考虑，指接竹规格材嵌合度为 0.1 mm 时，可得到较好的力学强度。

表 4 三种嵌合度指接竹规格材的 MOR 和 MOE 方差分析
Tab.4 MOR and MOE variance analysis for finger-jointed dimension bamboo lumber of three types of fitness ratios

性能指标	差异源	平方和	自由度	均方和	F	P 值	显著性
MOE	0 & 0.1	2.177	1	2.177	0.397	0.549	-
	0.1 & 0.3	2.745	1	2.745	0.404	0.541	-
	0 & 0.3	0.003	1	0.003	0.001	0.982	-
	组间	3.558	2	1.779	0.297	0.749	-
MOR	0 & 0.1	276.282	1	276.282	1.593	0.247	-
	0.1 & 0.3	367.193	1	367.193	2.144	0.177	-
	0 & 0.3	0.042	1	0.042	0.000	0.988	-
	组间	466.142	2	233.071	1.371	0.294	-

2.4 指接竹规格材与未指接竹规格材的性能对比

以嵌合度为 0.1 mm、垂直型（齿榫 II）指接竹规格材与未指接竹规格材以及其他材料的力学性能进行比较，结果见表 5。

表 5 不同材料的力学性能对比
Tab.5 Comparison of mechanical properties of different materials

性能指标	未指接竹规格材	指接竹规格材	竹篾层积指接材 ^[21]	指接竹 OSB 材 ^[9]	毛竹 ^[9]	落叶松 ^[9]
MOE/MPa	11.52	10.24	12.86	8.05	12.27	14.60
MOR/GPa	113.80	67.35	69.44	58.46	151.80	118.60
抗拉强度/MPa	94.47	45.02	79.60	18.41	185.00	129.90

表 5 显示，指接后竹规格材的静曲强度、抗弯弹性模量和抗拉强度与未指接竹规格材相比，保留率分别为 59.2%、88.9% 和 47.7%，拉伸性能下降较多。通过对比指接竹规格材与其他树种以及竹材人造板的性能发现，指接后的竹规格材比竹 OSB 指接材的各项性能要好，但低于毛竹和落叶松的性能。

根据 GB/T 26899—2011《结构用集成材》中机械分等层板力学性能的规定，指接竹规格材的抗弯性能和抗拉性能分别满足 M_E16 级（抗弯强度为 63.0 MPa、弹性模量为 16 000 MPa）和最高级 M_E18（抗拉强度为 42.5 MPa）的要求，具备作为结构材的潜力。

3 结论

1) 在本试验范围内, 垂直型指榫指接的胶接面积大于水平型指榫指接, 使垂直型指榫指接竹规格材的各项力学性能均优于水平型指榫指接, 建议后续采用垂直型指榫指接竹规格材。

2) 在垂直型指榫条件下, II型齿榫(齿长12 mm)、嵌合度为0.1 mm时, 指接竹规格材的力学性能较好, 与未指接竹规格材的性能相比, MOR、MOE和抗拉强度的保留率分别为59.2%、88.9%和47.7%; 抗弯性能和抗拉强度分别满足GB/T 26899—2011《结构用集成材》中机械分等层板力学性能M_E16级和最高级M_E18的要求, 具备作为结构材的潜力。

参考文献:

- [1] 郭伟, 任海青, 殷亚方, 等. 人工林杉木规格材目测分等研究[C]. 第一届全国生物质材料科学与技术学术研讨会, 北京: 中国林学会, 2007年11月.
- [2] 沈德长. 整竹砧板[P]. 中国专利, ZL: 201630442130.0, 2016-08-26.
- [3] 张丹. 竹束单板层积材连续成板工艺及性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [4] Mohammad M. Finger-joint process and products quality[Z]. FPInnovations Report 4016, Quebec, Canada, 2004.
- [5] Janowiak J, Labosky J P, Blankenhorn P R, et al. Finger-joint strength evaluations of three northeastern hardwoods[J]. Forest Prod J, 1993, 43(9): 23-28.
- [6] 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.
- [7] 郝金城, 刘稼人, 赵丹, 等. 指接材的加工条件和强度性能[J]. 林业科技, 1991, 16(2): 41-44.
HAO J C, LIU J R, ZHAO D, et al. Processing conditions and strength properties of finger-joint[J]. Forestry Science & Technology, 1991, 16(2): 41-44.
- [8] Ayarkwa J, Hirashima Y, Sasaki Y. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods[J]. Forest Prod J, 2000, 50(11/12): 53-63.
- [9] 崔萧. 竹筒展平板接长及其层压板的性能研究[D]. 浙江农林大学, 2018.
- [10] 刘星雨. 竹材原生态多方重组单元指接性能及设备研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [11] 刘星雨, 傅万四, 赵章荣, 等. 我国指接技术研究现状与发展趋势[J]. 木材加工机械, 2012, 23(5): 62-67.
LIU X Y, FU W Y, ZHAO Z R, et al. Research status and development trend of finger-joint technology in China[J]. Wood Processing Machinery, 2012, 23(5): 62-67.
- [12] 杨发明. 一种竹子展开装置[P]. 中国, 201811550360.3, 2019-03-29.
- [13] 贾满蓉. 木材指接齿形参数、工艺参数的选择[J]. 林业机械, 1993(2): 16-17.
JIA M R. Selection of tooth shape parameters and technological parameters of wood finger-joint[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1993(2): 16-17.
- [14] 林兰英, 傅峰. 短榫指接端压和嵌合度参数分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 138-142.
LIN L Y, FU F. Endpressure and fitness ratio for mini-finger jointing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 138-142.
- [15] 谢力生, 刘佳权, 乔鹭婷, 等. 结构用集成材落叶松层板指接工艺[J]. 林业科学, 2016, 52(9): 107-112.
XIE L S, LIU J Q, QIAO L T, et al. Finger-jointing technique of larch structural glued laminated timber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(9): 107-112.
- [16] 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.
- [17] Rao S, Gong M, Chuiy H, et al. Effect of end pressure on performance of structural finger-jointed lumber fabricated using a short joint profile[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2014, 72(1): 143-145.
- [18] 朱焕明, 鲍加芳. 间伐小径木指接技术研究[J]. 林业科学, 1994, 30(3): 259-265.
ZHU H M, BAO J F. A study on the technology of finger-jointed lumber from thinning[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994, 30(3): 259-265.
- [19] 郑瑞琪. 胶层厚度对胶接性能的影响[J]. 粘接, 1990, 11(4): 33-35.
ZHEN R Q. Effectss of adhesive layer thickness on bonding performance [J]. Technology of Adhesion & Sealing, 1990, 11(4): 33-35.
- [20] 黄仲华. 落叶松结构用胶合木层板指接技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [21] 孙玉慧, 江泽慧, 刘焕荣, 等. 竹定向刨花板指接工艺的研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 219-224.
SUN Y H, JIANG Z H, LIU H R, et al. Finger-jointing technique of bamboo oriented strand board[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 219-224.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)