

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2023014

人工林杉木结构用集成材层板抗弯性能研究

陈旭¹, 王玉荣¹, 龚迎春¹, 任海青¹, 赵磊²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 中林绿碳(北京)科技有限公司, 北京 100010)



摘要: 以人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 层板为研究对象, 分析3种指榫长度和4种嵌合度对杉木指接层板抗弯性能的影响, 比较不同等级杉木指接层板和非指接层板的抗弯性能, 建立抗弯性能之间的相关性方程。结果表明, 指榫长度与嵌合度对指接层板的抗弯强度和抗弯弹性模量有显著影响, 人工林杉木层板较优指接工艺参数为: 指榫长度15 mm、宽距比0.18、嵌合度0.1 mm; 分等对指接层板和非指接层板的抗弯性能亦有显著影响, I等、II等指接层板的抗弯强度特征值分别为28.7、26.6 MPa, 与未分等杉木指接层板抗弯强度特征值相比分别提高了17.14%和8.57%。基于应力波法获得的杉木层板动态抗弯弹性模量与静态抗弯弹性模量、静态抗弯弹性模量与抗弯强度之间均呈显著性正相关, 相关系数 r 分别为0.838和0.691。

关键词: 杉木; 结构用集成材; 层板; 指接工艺; 机械分等; 抗弯性能

中图分类号: S791.27; TU531 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2023) 05-0053-08

Bending Performance of Structural Glued Laminated Timber Laminae from Chinese Fir Plantation

CHEN Xu¹, WANAG Yurong¹, GONG Yingchun¹, REN Haiqing¹, ZHAO Lei²

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

2. Zhonglin Green Carbon (Beijing) Technology Limited Company, Beijing 100010, China)

Abstract: In this paper, the laminae from Chinese fir plantation (*Cunninghamia lanceolata*) were studied. The effects of three types of finger length and four types of Chimerism on the bending properties of Chinese fir finger-joint laminae were analyzed. The bending properties of different grades of Chinese fir finger-joint and nonfinger-joint laminae were obtained. And the correlated mathematical equation of the bending properties were established. The results showed that finger length and chimeric degree had a great influence on the bending properties of finger-joint laminae. Under the experimental conditions, the optimal process for the finger-joint laminae from plantation Chinese Fir were: finger length 15 mm, width to distance ratio 0.18, chimeric degree 0.1 mm. Grading had a great influence on the bending properties of finger-joint and nonfinger-joint laminae. The characteristic values of bending strength of grade I and

收稿日期: 2023-02-08; 修改日期: 2023-03-30

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); “十四五”国家重点研发计划课题“结构用大规格集成材的制造与评价关键技术”(2021YFD2200605); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目“结构用木质复合新型材料制造与应用关键技术”(2023TSGC0821)。

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

grade II finger-joint laminae were 28.7 MPa and 26.6 MPa, respectively. They were 17.14% and 8.57% higher than those of nongraded Chinese fir finger-joint laminae, respectively. The dynamic elastic modulus and static elastic modulus based on the stress wave method, static elastic modulus, and bending strength of Chinese fir laminae were significantly positive correlated. The correlation coefficient was 0.838 and 0.691, respectively.

Key words: Chinese fir; structural glued laminated timber; laminae; finger-joint process; machine grading; bending properties

人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国传统的建筑用材, 广泛种植于浙江、福建、贵州等省, 种植面积 990.20 万 hm^2 , 蓄积量 7.55 亿 m^3 , 在人工林树种中排名第一^[1-4]。近年来, 国内学者主要围绕人工林杉木的遗传培育、材质改良、力学性能等方面开展了基础研究^[5-7]。结构用集成材是我国梁柱式、井干式现代木结构建筑的主要材料, GB/T 26899—2022《结构用集成材》中规定杉木属于SZ5等级树种群, 杉木层板经分等、指接后可以用来制备结构用集成材。基于复合层板理论, 结构用集成材的抗弯强度与层板的抗弯强度呈正相关, 层板分等和指接工艺是影响结构用集成材抗弯强度的重要因素。

目前针对人工林杉木的利用主要集中在家具领域, 大量种植的人工林杉木由于径级小、材质差等因素, 不能满足现代木结构建筑对材料的基本要求。国外一般采用目测分级和机械应力分级方法对层板进行分级, 研究表明层板分等后, 不同等级层板力学强度变异系数显著减小, 其中较高等级层板的抗弯弹性模量、抗弯强度、抗拉强度相比较未分等层板的力学性能有显著提高^[8-11], 经分等后的层板才能用于制备结构用集成材。应力波法是一种常用的动态抗弯弹性模量分级测试方法, 检测方式简便灵活, 在木材力学性能的无损检测与评估方面应用广泛, 技术较为成熟^[12]。同时, 层板指接是结构用集成材制备的关键环节, 指榫长度和嵌合度是控制层板指接性能的关键工艺参数。研究表明指榫长度 20 mm 的杉木指接层板, 其抗弯强度和抗拉强度明显高于指榫长度 25 和 35 mm 的指接层板^[13]。嵌合度的选取与指榫长度和树种密切相关, 落叶松 (*Larix gmelinii*) 指榫长度 25 和 28 mm、14 和 19 mm 的合适嵌合度分别为 0.2、0.1 mm^[14-15]; 辐射松 (*Pinus radiata*) 和桉树

(*Eucalyptus* spp.) 指接层板嵌合度选择 0.1 mm^[16-17]。不同树种层板指榫长度选择范围变化较大, 而嵌合度的选取较集中。由于嵌合度和指榫长度存在相互影响, 针对人工林杉木用于结构用集成材层板的指榫长度和嵌合度的选择需要进一步研究。

基于上述分析, 笔者以人工林杉木结构用集成材层板为研究对象, 采用应力波动态测试对人工林杉木层板进行抗弯弹性模量分等, 依据 GB/T 26899—2022“四点”和“三点”静态法分别测试人工林杉木指接和非指接层板抗弯性能, 分析 3 种指榫长度和 4 种嵌合度对杉木指接层板抗弯性能的影响, 基于参数法获得不同等级杉木指接层板抗弯强度特征值, 采用线性拟合建立抗弯力学性能之间的相关性数学方程, 为人工林杉木在结构材领域的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杉木选自浙江省丽水市人工林杉木培育示范基地, 树龄为 30 年, 原木小头直径为 25 cm 以上。经锯解、干燥和刨光后层板尺寸为 40 mm×140 mm×2 500 mm (厚×宽×长), 试件数量为 549 根, 含水率平均值为 11.12%, 气干密度平均值为 0.354 g/cm^3 。

胶黏剂: 双组份聚氨酯, 黏度 9 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (25 $^{\circ}\text{C}$), 密度 1.17 g/cm^3 , pH 值为 7.0; 主剂与固化剂质量比为 100:15。

1.2 试验设备

微机控制电子万能试验机、FAKOPP 微秒级应力波测试仪、四面刨铣机、气动截料锯、自动铣齿机等。

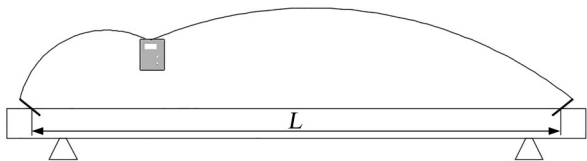
1.3 试验方法

1.3.1 机械分级 杉木层板动态弹性模量参照 LY/T 2382—2014《应力波无损测试锯材动态弹性模量

方法》测试。使用FAKOPP 应力波测试仪，将激发器和接收器对称嵌入层板端部，嵌入深度1 cm，嵌入角度45°，嵌入点与端面距离不超过50 mm。采用小锤匀力快速敲击激发器顶部，采集应力波从激发器到接收器的时间，测量试件的尺寸、质量、激发器与接收器间的直线距离，见图1。依据式1计算层板动态弹性模量：

$$E_{sw} = \rho \times (L/t)^2 \times 10^3 \tag{1}$$

式中： E_{sw} 为动态弹性模量，GPa； ρ 为密度，kg/m³； L 为激发器与接收器间的距离，m； t 为传播时间， μ s。



L : 激发器与接收器间的直线距离。

图1 应力波方法测试杉木层板动态弹性模量示意图

Fig.1 Testing diagram of dynamic elastic modulus of Chinese fir laminae using stress wave method

1.3.2 指接工艺参数 为减少人工林杉木本身材质变异性对指接层板抗弯性能的影响，指接工艺参数优化试验选用II等层板，采用垂直指接，选取12、15、19 mm指榫长度和0、0.1、0.2、0.3 mm嵌合度组合对榫齿进行加工，每组重复12次，总共144根指接层板，指接参数见表1，榫齿参数示意图见图2。榫齿加工时，预先控制铣刀的进给量，采用游标卡尺测量齿顶宽和齿底宽，再通过微调铣齿机获得准确的嵌合度。采用双面涂胶，涂胶量为200 g/m²，端压为10~15 N/mm²，加压时间3~5 s。养生静置48 h后进行四面刨光，最终指接层板尺寸为140 mm×35 mm×1 000 mm。

1.3.3 静态抗弯性能测试

1) 非指接层板抗弯性能测试：从“Ⅰ等”“Ⅱ等”“Ⅲ等”三个等级中随机选择杉木层板28根。杉木非指接层板抗弯性能参照GB/T 26899—2022“三点”弯曲法进行平弯试验，测试试件尺寸为140 mm×35 mm×1 000 mm，试验跨距为735 mm，试验加载速度为5 mm/min。

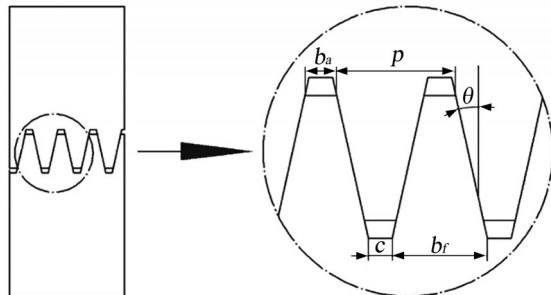
2) 指接层板抗弯性能测试：基于优化的指接工艺参数，分别单独对“Ⅰ等”“Ⅱ等”“Ⅲ等”三个等级中随机选择杉木层板进行指接，样本数为

表1 指接工艺加工参数

Tab.1 Machining parameters of finger tenon

铣刀类型	参考指榫长度/mm	嵌合度/mm	指距/mm	指顶宽/mm	斜率	宽距比
I型	12	0	4.0	0.6	1/8.87	0.15
		0.1				
		0.2				
		0.3				
II型	15	0	4.0	0.7	1/12.90	0.18
		0.1				
		0.2				
		0.3				
III型	19	0	6.0	1.2	1/10.51	0.20
		0.1				
		0.2				
		0.3				

注：宽距比是指顶宽与指距的比值。



b_a —齿顶宽； c —齿底宽； p —齿距。

图2 榫齿参数示意图

Fig.2 Diagram of finger joint parameters

28根。杉木指接层板抗弯性能参照GB/T 26899—2022“四点”弯曲法进行平弯试验，将层板指接位置放置于长度方向的中心位置，试验跨距为735 mm，试验加载速度为5 mm/min。

3) 含水率调整：含水率对层板强度有显著影响，因此参照GB/T 26899—2022，统一将杉木指接和非指接层板抗弯性能计算结果调整试件含水率至约12%时的抗弯弹性模量和抗弯强度。

1.3.4 强度特征值计算 特征值是木质工程材料安全性和可靠性设计的依据，参照GB 50005—2017采用参数法确定强度特征值，按照式2计算^[18]。

$$f_k = \sigma_{12\%, \text{mean}} - ks \tag{2}$$

式中： f_k 为试件含水率为12%时的特征值，MPa； $\sigma_{12\%, \text{mean}}$ 为试件含水率为12%时的抗弯强度平均值，MPa； k 为特征系数； s 为试件标准差，MPa。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel、SPSS 数据分析软件，对不同指接工艺、不同等级杉木层板的抗弯强度和抗弯弹性模量数据进行统计和差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 杉木层板分等

杉木层板的动态弹性模量基本呈正态分布，如图 3 所示。为合理利用木材，提高优质材的出材率，将动态弹性模量按照“>11.5 GPa”“9.5~11.5 GPa”“<9.5 GPa”进行分级，分别命名为“I等”“II等”“III等”，其中II等及以上杉木层板占比80%以上。各等级的杉木层板动态抗弯弹性模量的平均值分别为12.58、10.45、8.84 GPa，占比为24.23%、58.83%、16.94%，结果列于表2。

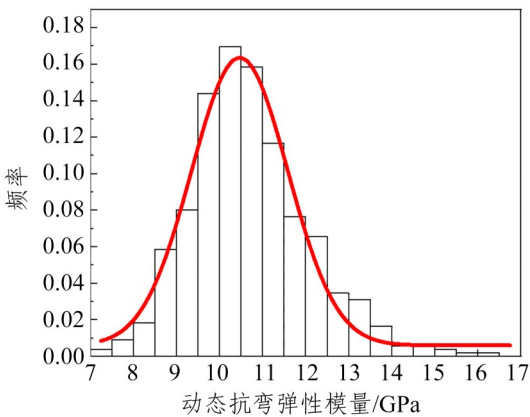


图3 杉木层板动态抗弯弹性模量分布
Fig.3 Distribution of dynamic elastic modulus of Chinese fir laminae

表2 杉木层板动态抗弯弹性模量分级
Tab.2 Grades of Chinese fir laminae using dynamic elastic modulus

等级	I等	II等	III等
动态抗弯弹性模量分布区间/GPa	>11.5	9.5~11.5	<9.5
层板数量/根	133	323	93
平均值/GPa	12.58	10.45	8.84
数量占比/%	24.23	58.83	16.94

2.2 指接工艺参数对指接层板抗弯性能影响

由表3可知，在不同指接工艺参数下杉木层板抗弯强度范围为23.34~34.84 MPa，抗弯弹性模量范围为8.62~10.01 GPa。

表3 不同指榫长度和嵌合度组合下的指接层板抗弯性能
Tab.3 The bending performance of finger-joint laminae with different combinations of finger length and chimerism

指榫长度/ mm	嵌合度/ mm	抗弯强度/MPa		抗弯弹性模量/GPa	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
12	0	29.81	3.84	8.88	0.82
	0.1	32.79	4.04	9.25	0.50
	0.2	23.34	3.75	9.26	0.76
	0.3	27.95	3.01	9.57	0.56
15	0	30.24	5.10	8.62	0.74
	0.1	34.84	4.09	9.50	0.70
	0.2	29.78	4.40	9.11	0.62
	0.3	31.40	3.72	8.86	0.80
19	0	23.37	3.66	9.27	0.79
	0.1	30.27	2.61	10.01	0.57
	0.2	29.80	2.23	9.74	0.42
	0.3	28.97	2.33	9.46	0.97

2.2.1 指榫长度对指接层板抗弯性能影响 为了研究指榫长度单因素对指接层板抗弯性能影响，将同一指榫长度下不同嵌合度（0、0.1、0.2、0.3 mm）层板抗弯强度和抗弯弹性模量不做区分，试验结果见图4。

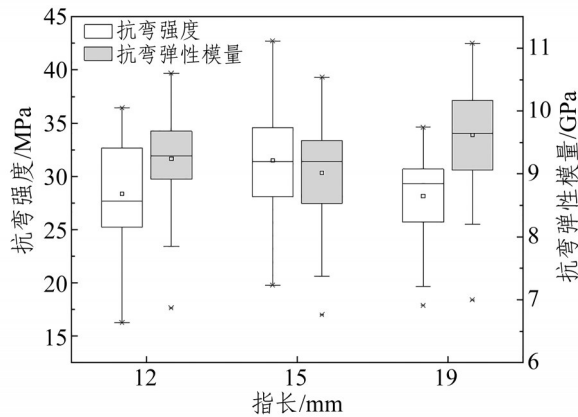


图4 不同指榫长度层板的抗弯强度和抗弯弹性模量均值比较

Fig.4 Comparison of MOR and MOE between finger-joint laminae with different finger lengths

由图4可知，指接层板抗弯强度随着指榫长度增加呈现先增后减趋势，指榫长度为15 mm层板的抗弯强度为31.50 MPa，比指榫长度12、19 mm层板的抗弯强度分别提高了11.03%、11.86%。

有研究表明：抗弯强度与指接的有效胶接面积大小呈正相关，指榫长度较短、榫齿宽距比较大时，其有效胶接面积较小，抗弯强度降低^[19-20]。有研究建议^[21]，15.35 mm指榫长度的优选齿距

6 mm、齿顶宽 1.2 mm，与本试验所选取的榫齿参数近似。相比较抗弯强度，指接层板抗弯弹性模量呈现相反趋势，但变化幅度不大，指榫长度 15 mm 的层板抗弯弹性模量比指榫长度 12 mm 和 19 mm 的层板降低了 2.38%、6.24%。不同指榫长度层板抗弯强度和抗弯弹性模量，在 0.05 显著水平上存在显著性差异。

2.2.2 嵌合度对指接层板抗弯性能影响 研究嵌合度单一因素对指接层板抗弯性能影响，将同一嵌合度下不同嵌指榫长度（12、15、19 mm）层板抗弯强度和抗弯弹性模量不做区分，见图 5。

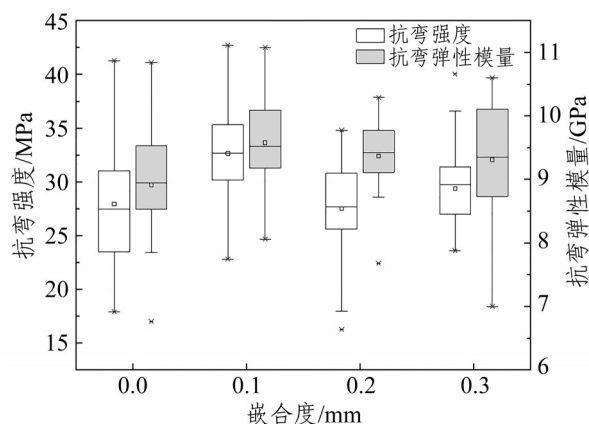


图5 不同嵌合度层板的抗弯强度和抗弯弹性模量均值比较

Fig.5 Comparison of mean values for MOR and MOE of specimens with different chimerisms

由图 5 可知：嵌合度为 0.1 mm 层板抗弯强度和抗弯弹性模量最大。有研究表明：若嵌合度为 0，榫齿易从齿顶部压溃，造成指接处存在强度缺陷；若嵌合度过大，榫齿顶部易产生应力集中，影响指接层板抗弯性能^[20, 22-23]。通过差异显著性检验，不同嵌合度下层板的抗弯强度和抗弯弹性模量在 0.05 显著水平上差异显著。结合本试验，建议杉木层板指接材生产指榫长度采用 15 mm，嵌合度采用 0.1 mm。

2.3 分等对杉木层板抗弯性能的影响

基于优化的指接工艺，采用 15 mm 指榫长度和 0.1 mm 嵌合度对“Ⅰ等”“Ⅱ等”“Ⅲ等”杉木层板进行指接。不同等级指接层板与非指接层板抗弯强度和抗弯弹性模量平均值和标准偏差见表 4 和图 6。

表 4 不同等级指接与非指接层板的抗弯性能

Tab.4 The bending performance of different grades between finger-joint and nonfinger-joint laminae

等级	指接形式	抗弯强度/MPa		抗弯弹性模量/GPa	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
Ⅰ等	非指接	42.43	5.50	12.11	1.25
	指接	37.05	4.42	10.94	0.56
Ⅱ等	非指接	36.96	3.74	10.38	0.87
	指接	31.80	2.75	9.32	0.67
Ⅲ等	非指接	32.46	2.69	8.84	0.97
	指接	29.59	3.00	8.13	0.56

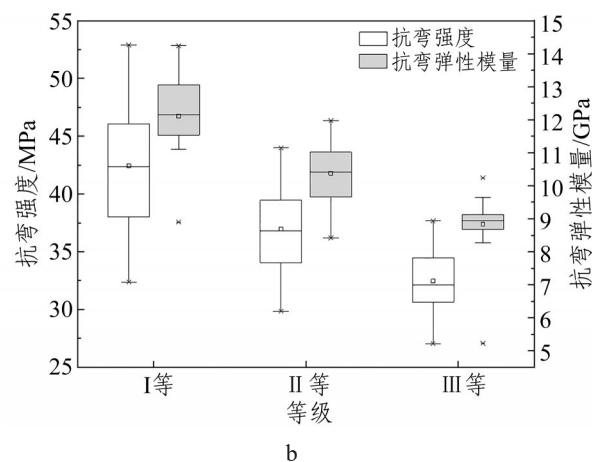
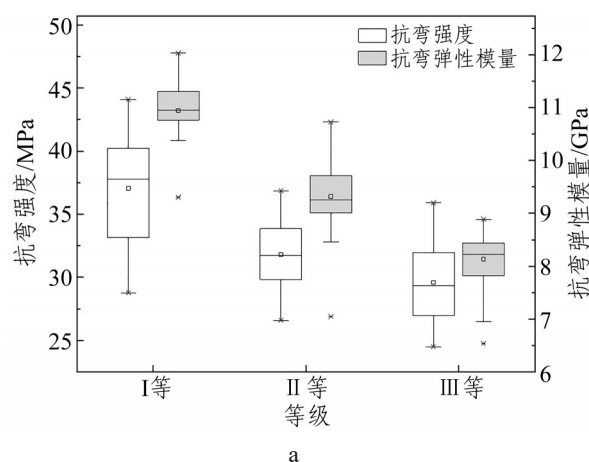


图 6 不同等级指接层板(a)、与非指接层板(b)的抗弯强度和抗弯弹性模量分布

Fig.6 Distribution of bending strength and static elastic modulus of finger-joint(a) and nonfinger-joint(b) laminae of different grades

对不同等级层板抗弯强度和抗弯弹性模量差异进行显著性分析，在 0.05 显著性水平上，不同等级指接与非指接层板的抗弯强度、抗弯弹性模量均值存在显著差异。

不同等级指接层板抗弯强度和抗弯弹性模量变化趋势与非指接层板变化趋势一致, I等非指接层板抗弯强度和抗弯弹性模量均值最大, 分别为 42.43 MPa 和 12.11 GPa, 与 III 等非指接层板抗弯强度和抗弯弹性模量相比分别提高了 30.71% 和 36.99%。研究发现花旗松、欧洲云杉和赤松层板指接后抗弯强度分别降低了 18%、26% 和 31%^[24]。本试验中不同等级杉木层板指接后抗弯强度明显降低, 较非指接层板降低了 8.84%~13.96%。这是由于层板承受弯曲力时, 原本具有连续性结构的木纤维被破坏, 不仅难以通过拉伸变形的途径抵抗荷载, 而且锯齿形的指榫形状更容易发生应力集中, 产生细小裂纹, 导致破坏起始于指接位置, 指接层板在低于木材破坏荷载前发生断裂, 造成指接层板的抗弯强度降低^[25]。

非指接层板抗弯破坏模式见图 7a, 破坏开始于木材缺陷处, 如节子、裂纹、斜纹理等, 导致层板底部木材纤维受拉破坏, 断裂部位具有随机性。杉指接层板抗弯破坏模式见图 7b、7c, 除节子、斜纹理等缺陷处破坏, 主要包括指根处断裂和指接处层板受拉破坏, 其他部位较少出现断裂, 断裂部位具有明显的规律性和可预判性。此外, 指接层板破坏发生在齿根处时, 裂缝沿着根部和木材部分发展, 未发生指齿从齿槽根部结合部位拔出, 表明本试验条件下杉木指接材的指接胶合质量良好。

不同等级指接层板的抗弯强度特征值见表 5。未分等杉木指接层板抗弯强度特征值为 24.5 MPa, I 等、II 等和 III 等指接层板抗弯强度特征值分别为 28.7、26.6、23.9 MPa。其中 I 等、II 等指接层板抗弯强度特征值有效提高, 比未分等指接层板抗弯强度特征值分别提高了 17.14% 和 8.57%。

2.4 层板力学性能相关性分析

抗弯强度是评估层板力学性能好坏的主要指标, 需要通过大量破坏试验才能得到, 成本较高。因此, 可以采用非破坏试验抗弯弹性模量来预测抗弯强度。本研究采用相关性分析方法, 建立人工林杉木层板动态抗弯弹性模量与静态抗弯弹性模量, 静态抗弯弹性模量与抗弯强度之间的相关性数学方法, 结果如表 6 和图 8 所示。

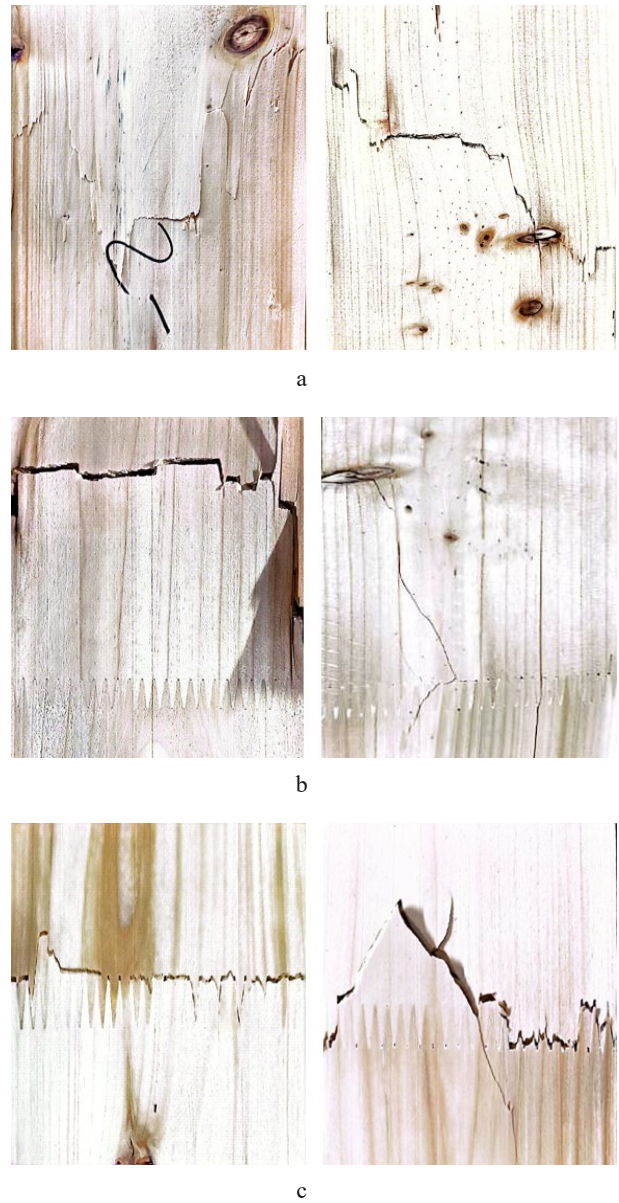


图 7 杉木层板的抗弯破坏模式
Fig.7 Failure modes of Chinese fir laminae

表 5 不同等级指接层板的抗弯强度特征值
Tab.5 Characteristic value for the bending strength of finger-joint laminae at different grades

等级	抗弯强度特征值/MPa
I 等	28.7
II 等	26.6
III 等	23.9
总体	24.5

经分析比较可知: 杉木层板动态抗弯弹性模量与静态抗弯弹性模量, 静态抗弯弹性模量与抗弯强度之间均呈显著正相关, 相关系数 r 分别为

表6 杉木层板力学性能相关性及回归关系			
Tab.6 Correlation and regression of mechanical properties of Chinese fir laminae			
变量-变量	皮尔逊检验		回归方程
	<i>r</i>	<i>P</i>	
动态-静态抗弯弹性模量	0.838	0.000**	$y=0.861x+1.385$
静态抗弯弹性模量-抗弯强度	0.691	0.000**	$y=2.495x+10.159$

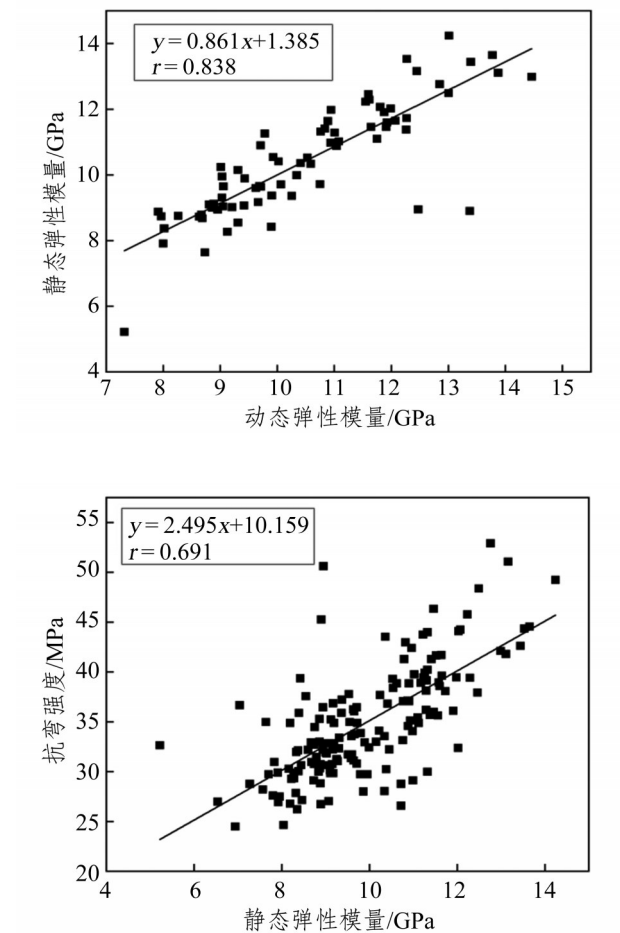


图8 杉木层板力学性能之间的线性拟合

Fig.8 Linear fitting of mechanical properties of Chinese fir laminae

0.838和0.691。有研究表明不同产地杉木规格材的动态、静态弹性模量之间的相关系数在0.67~0.89之间^[26]，采用应力波测试意杨锯材、落叶松锯材和巨尾桉木材的动态弹性模量与静态弹性模量的相关性系数分别为0.840、0.773和0.635^[12, 27-28]。以上研究结果与本论文一致，应力波方法获得的动态抗弯弹性模量基本上能够预测层板的静态抗弯弹性模量^[29-30]。

3 结论

1) 指榫长度、嵌合度对人工林杉木层板抗弯强度和抗弯弹性模量均存在显著影响，建议较优的指接参数为指榫长度15 mm，嵌合度0.1 mm，宽距比0.18。

2) 不同等级人工林杉木层板抗弯弹性模量和抗弯强度存在显著性差异，指接层板抗弯强度和抗弯弹性模量平均值低于非指接层板，I等、II等、III等指接层板抗弯强度特征值分别为28.7、26.6、23.9 MPa。I等、II等指接层板，相比较未分等杉木指接层板抗弯强度特征值分别提高了17.14%和8.57%。

3) 杉木层板动态抗弯弹性模量与静态抗弯弹性模量、静态抗弯弹性模量与抗弯强度之间均呈显著性正相关，相关系数*r*分别为0.838和0.691；动态抗弯弹性模量与静态抗弯弹性模量的拟合数学方程为 $y=0.861x+1.385$ ，静态抗弯弹性模量与抗弯强度的拟合数学方程为 $y=2.495x+10.159$ 。应力波方法获得的动态抗弯弹性模量基本上能够预测层板的静态抗弯弹性模量。

参考文献：

- [1] BI J, BLANCO J A, SEELY B, et al. Yield decline in Chinese-fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(9): 1615-1630.
- [2] 颜耀, 李秉钧, 何宗明, 等. 不同种源杉木木材特性的比较研究[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 49-57.
YAN Y, LI B J, HE Z M, et al. Comparative study on wood characteristics of *Cunninghamia lanceolata* from different provenances[J]. Forest Research, 2021, 34(5): 49-57.
- [3] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告[M]. 中国林业出版社, 2019.
- [4] 周永东, 高鑫, 周凡, 等. 40 mm厚杉木锯材高温干燥工艺研究[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 54-58.
ZHOU Y D, GAO X, ZHOU F, et al. High-temperature drying technology for 40 mm-thickness Chinese fir lumber[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(2): 54-58.
- [5] 王燕, 张源, 李萍, 等. 硅镁凝胶强化人工林杉木的制备工艺优化及性能研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 125-133.
WANG Y, ZHANG Y, LI P, et al. Technology optimization and properties of Chinese fir plantation wood strengthened by silica and magnesium gel[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 125-133.
- [6] 江京辉, 周凡, 翁翔, 等. 人工林杉木树木含水率与密度分布规律[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(6): 956-960.
JIANG J H, ZHOU F, WENG X, et al. The law of moisture content and oven density of plantation Chinese fir green wood[J]. Journal of Anhui Agricultural University. 2019, 46(6): 956-960.
- [7] 李超, 王哲, 郭宇, 等. 人工林杉木管胞形态与基本密度径向变异规律研究[J]. 林产工业, 2019, 56(12): 30-33.

- LI C, WANG Z, GUO Y, et al. Radial variation of tracheid morphology and basic density of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. China Forest Products Industry, 2019, 56(12): 30-33.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 乔鹭婷, 谢力生, 唐子桑, 等. 人工林杉木层板分级及性能研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(1): 41-45.
- QIAO L T, XIE L S, TANG Z S, et al. Study on the grading and property of plantation Chinese fir lamina[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(1): 41-45.
- [11] 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, LV 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.
- [12] 周志茹, 赵茂程, 王正. 意杨木材弹性模量3种方法检测的比较[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(4): 368-373.
- ZHOU Z R, ZHAO M C, WANG Z. Comparative study of modulus of elasticity of populus euramericana lumber with three nondestructive methods[J]. Journal of Forest and Environment, 2014, 34(4): 368-373.
- [13] ZHOU H B, REN H Q. Factors Influencing structural performance of finger-jointed Chinese fir lumber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174: 635-640.
- [14] Özçifçi A, Yapıcı F. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations[J]. Construction and Building Materials, 2007, 22(7): 1543-1550.
- [15] 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. Experimental study on finger joint technology of larch wood for structure[J]. Wood Processing Machinery, 2012, 23(2): 21-25.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] GB 50005—2017, 木结构设计标准[S].
- GB 50005—2017, Standard of design of timber structures[S].
- [19] 乔鹭婷. 用人工林杉木制造工程胶合木关键技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [20] 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. Parameter selections of finger shape and process of wood[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1993(2): 16-17.
- [21] 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.
- [22] 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. End pressure and fitness ratio for mini-finger jointing [J]. Journal of Beijing Forestry University. 2008, 30(2): 138-142.
- [23] Avila C, Beauregard R, Mohammad M, et al. Structural performance of finger-jointed black spruce laminate with different joint configurations[J]. Forest Products Journal, 2003, 53(9): 1-6.
- [24] 杨春梅, 王德福, 梁峰, 等. 不同组胚层板胶合木力学性能研究[J]. 建筑技术, 2019, 50(4): 406-408.
- YANG C M, WANG D F, LAING F, et al. Study on mechanical property of glued-laminated board of different lay-up forms[J]. Architecture Technology, 2019, 50(4): 406-408.
- [25] 杨亮庆, 周亚菲, 张倩, 等. 结构指接材破坏特性分析[J]. 林业科技, 2015, 40(5): 45-47.
- YANG L Q, ZHOU Y F, ZHANG Q, et al. Failure characteristics of structural finger jointed timber[J]. Forestry Science & Technology, 2015, 40(5): 45-47.
- [26] 周海宾, 任海青, 殷亚方, 等. 横向振动评估木结构建筑用规格材弹性性质[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(3): 271-275.
- ZHOU H B, REN H Q, YIN Y F, et al. Evaluating static elastic properties of wood structure building dimension laminate using transverse vibration[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(3): 271-275.
- [27] 杨洋. 落叶松锯材无损检测结果与静态抗弯性能关系的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [28] 罗彬, 殷亚方, 姜笑梅, 等. 3种无损检测方法评估巨尾桉木材抗弯和抗压强度性质[J]. 北京林业大学学报, 2008(6): 137-140.
- LUO B, YIN Y F, JIANG X M, et al. Evaluating bending and compressive strength properties of *Eucalyptus grandia* × *E. urophylla* plantation wood with three nondestructive methods[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008(6): 137-140.
- [29] 聂玉静, 孙正军, 郭伟峰. 两种无损检测方法评估足尺杉木规格材动态弹性模量[J]. 木材加工机械, 2011, 22(3): 21-23, 20.
- NIE Y J, SUN Z J, GUO W F. Evaluating dynamic modulus of elasticity of *Cunninghamia lanceolata* dimension lumber with two nondestructive methods[J]. Wood Processing Machinery, 2011, 22(3): 21-23, 20.
- [30] 安源, 殷亚方, 王喜平, 等. 无损检测技术评估规格材的性质[J]. 木材工业, 2009, 23(4): 5-8.
- AN Y, YIN Y F, WANG X P, et al. Evaluation of bending performance of structural lumber using nondestructive methods[J]. China Wood Industry, 2009, 23(4): 5-8.

(本文编校 向琴)