

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025079

高性能杨木重组木顺纹抗拉强度尺寸效应研究

武国芳, 张亚慧, 钟永, 任海青

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 高性能重组木作为一种新型工程木产品, 因其优异的力学性能和尺寸稳定性在建筑领域具有广泛的应用潜力, 但其尺寸效应对力学强度的影响尚缺乏系统研究。研究制备不同截面积和受拉长度的高性能杨木重组木试件, 测试其顺纹抗拉强度, 采用对数正态分布分析强度百分位数, 并基于最弱链理论确定尺寸效应系数。结果表明, 随着截面积和受拉长度变化, 高性能杨木重组木的抗拉强度存在明显的尺寸效应。受拉长度尺寸效应系数 k_L 大于截面积尺寸效应系数 k_A , 且两者均随强度百分位数 P_f 增加呈线性增长, 分别满足关系式 $k_L = 0.056 + 0.046P_f$ 、 $k_A = 0.038 + 0.053P_f$ 。根据受拉长度和截面积尺寸效应系数的差异, 提出结合高性能杨木重组木受拉长度和截面积两个维度尺寸变化的抗拉强度折减系数计算方法。

关键词: 高性能杨木重组木; 尺寸效应; 顺纹抗拉强度; 最弱链理论; 截面积; 受拉长度

中图分类号: S792.11; S781.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 01-0051-06

Study on Size Effect on Tensile Strength Parallel to Grain of High-Performance Poplar Wood Scrimber

WU Guofang, ZHANG Yahui, ZHONG Yong, REN Haiqing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: High-performance wood scrimber, as a novel engineered wood product, exhibits significant potential for applications in construction due to its excellent mechanical properties and dimensional stability. However, the size effect on its mechanical strength remains understudied. This study focused on high-performance poplar wood scrimber, preparing specimens with varying cross-sectional areas and tensile lengths to test their tensile strength parallel to grain. The strength percentiles were analyzed using a lognormal distribution, and size effect coefficients were determined based on the weakest link theory. Results indicated that the tensile strength of high-performance poplar wood scrimber exhibited a significant size effect with changes in cross-sectional area and tensile length. The size effect coefficient of tensile length (k_L) was greater than that of cross-sectional area (k_A), and both increase linearly with the strength percentile (P_f), satisfying the relationships $k_L = 0.056 + 0.046P_f$ and $k_A = 0.038 + 0.053P_f$. Based on the differences in size effect coefficients of tensile length and cross-sectional area, a method for calculating reduction factor of tensile strength was proposed, taking into account the size variations in both tensile length and cross-sectional area of high-performance poplar wood scrimber.

收稿日期: 2025-07-30; 修改日期: 2025-09-09

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“高性能重组木连续化制造关键技术与装备”(2021YFD2200601); “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)。

作者简介: 武国芳 (1986—), 男, 副研究员。Email: gfwu@caf.ac.cn

Key words: high-performance poplar wood scrimber; size effect; tensile strength parallel to grain; weakest link theory; cross-sectional area; tensile length

高性能重组木是以纤维化单板为基本单元,通过浸渍胶黏剂并热压而成的木质材料^[1],具有优良的耐水性能和力学强度,在工程木领域应用潜力巨大^[2]。作为生物质材料,构件尺寸增大时,因其内部缺陷增多,从而导致力学强度降低的现象称为“尺寸效应”^[3]。在实验室中,通常采用小尺寸的试件进行力学性能测试,获得具有统计意义的强度数据。然而,实际工程中使用构件的尺寸往往远大于实验室试件,二者之间由于尺寸不同导致强度差异显著。只有探明材料强度随尺寸的变化规律,才能量化材料的尺寸效应,建立小尺寸试件与大尺寸构件之间的力学性能转换关系,从而将实验室测试指标转化为工程设计指标。因此,研究工程材料的尺寸效应,对确定生物质材料的设计指标至关重要。

通常通过韦伯(Weibull)脆性断裂理论^[4]描述脆性材料的尺寸效应。BOHANNAN^[5]考虑受弯构件中的非均匀应力分布,将该理论应用于木梁。随后,学者们对锯材或规格材的尺寸效应进行了广泛研究^[3,6-8],据此建立的锯材及规格材设计指标调整方法已经应用于各国木结构设计标准中。针对单板层积材和正交胶合木的研究发现^[9-10],其顺纹抗拉与抗压强度随试件尺寸的增大而减小。对于重组竹材料,采用不同方法(斜率法、参数法和边界效应模型)可以确定其抗弯强度和剪切强度^[11]、抗压强度和承载力^[12]的尺寸效应系数;对其抗拉^[13]和抗压强度^[14]的尺寸效应研究发现,在试验范围内,各强度随尺寸变化呈现不同的趋势,抗拉强度不受尺寸变化的影响,抗压强度随试件截面积增大而降低。上述文献表明,现有研究多采用不同尺寸试件进行测试,通过斜率法、参数法或者边界效应模型等方法评估材料的尺寸效应,不同材料、不同性能的尺寸效应差异较大,一些指标具有明显的尺寸效应,但另一些指标无此现象。目前关于高性能重组木尺寸效应的研究尚属空白,试验数据和模型的缺乏导致无法基于实验室数据确定高性能重组木工程构件的设计指标,限制了其在建筑结构中的进一步推广与应用。

鉴于此,本研究以高性能杨木重组木为对象,制备不同尺寸试件,测试其顺纹抗拉强度,并采用对数正态分布确定强度百分位数,最后基于最弱链理论的斜率法确定尺寸效应系数,为高性能重组木在建筑结构中的安全应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

高性能杨木重组木:密度约为 0.9 g/cm^3 ,酚醛树脂胶黏剂施胶量为17%,规格尺寸为 $1\,900 \text{ mm}$ (长度) $\times 135 \text{ mm}$ (宽度) $\times 138 \text{ mm}$ (厚度),10根,单个构件质量约32 kg,含水率为8.4%。由江苏某公司生产。

1.2 试验设备

微机控制电液伺服卧式拉伸试验机(LAW-1000)、万能木工机床、自动单面刨等。

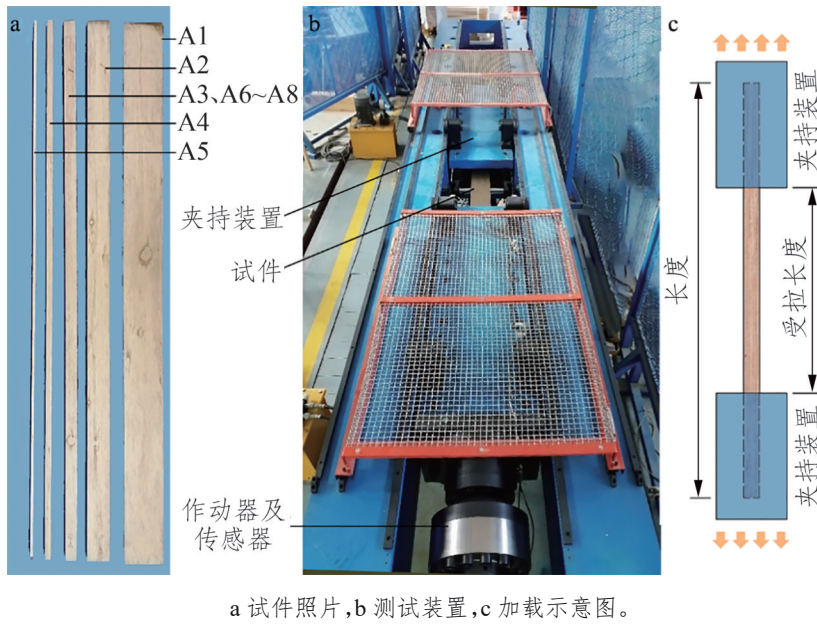
1.3 试验方法

每根高性能杨木重组木在厚度方向锯成6块。按宽度变化(A1~A5组)、受拉长度变化(A6~A8组),共设置8组试件(表1)。在宽度方向,以10 mm为基础,按指数增长方式设定各组试件的宽度,受限于材料的尺寸,最大宽度取135 mm。为研究受拉长度对抗拉强度影响,将A6~A8组受拉长度按指数方式变化进行设定,最小为150 mm,受限于材料的尺寸,最大受拉长度为900 mm。试件照片如图1a所示。通过随机编号和分配,确保

表1 高性能杨木重组木试件的尺寸和数量

Tab.1 Specimen size and number of high-performance poplar wood scrimber

组别	宽度 $b/$ mm	厚度 $h/$ mm	受拉长度 $L/$ mm	试件总长 $L_T/$ mm	试件数量
A1	135	20	600	1 900	20
A2	80	20	600	1 900	20
A3	40	20	600	1 900	20
A4	20	20	600	1 900	20
A5	10	20	600	1 900	20
A6	40	20	900	1 900	20
A7	40	20	300	1 900	20
A8	40	20	150	1 900	20



a 试件照片, b 测试装置, c 加载示意图。

图1 高性能杨木重组木拉伸试件、测试装备和加载示意图

Fig.1 Tensile specimens, testing equipment and loading schematic diagram of high-performance poplar wood scrimber

来自同一构件或相同高度的板材分散至不同组，降低试件间的相关性。

1.4 性能测试

拉伸性能按照 GB/T 28993—2012《结构用锯材力学性能测试方法》进行测试。在测试前，试件两端由夹具夹紧；随后，控制作动器移动速度，使试件在 1.5 min 左右被拉断。A1~A5 组试件夹具之间的受拉长度设置为 600 mm。A6~A8 组试件的受拉长度介于 150~900 mm 之间。测试装置和加载示意图如图 1b 和 1c 所示。在测试过程中，对于破坏发生在夹具夹持区域或受拉长度范围外的试件，因无法准确反映顺纹抗拉强度而被剔除。

1.5 数据分析

根据最弱链理论，在拉伸荷载下构件的强度等于从该构件上切下的最弱单元的强度。假设这些单元的强度服从韦伯分布，则体积为 V 的构件的失效概率 $p(\sigma)$ 可采用公式 (1) [15] 表示。

$$p(\sigma) = 1 - e^{-V\left(\frac{\sigma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中： V 为构件体积， mm^3 ； σ 为拉应力， MPa ； α 为韦伯分布的尺度参数； β 为韦伯分布形状参数。

假设失效概率相同，两个不同体积构件的强度存在如下关系。

$$\frac{f_2}{f_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \quad (2)$$

式中： f_1 、 f_2 为两个构件的强度， MPa ； V_1 、 V_2 为两个构件的体积， mm^3 ； k 为尺寸效应系数，是韦伯分布形状参数 β 的倒数。

基于公式 (2)，一旦确定了体积为 V_0 的参考构件的强度，就可以确定任意体积构件的强度。

$$f = \xi f_0 = f_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-k_v} \quad (3)$$

式中： ξ 为强度折减系数； f 、 f_0 为目标构件和参考构件的强度， MPa ； k_v 表示与体积相关的尺寸效应系数。

研究表明，尺寸效应在不同维度上可能会不同 [3, 5, 14]。基于高性能杨木重组木的加工工艺，本研究重点关注截面积和受拉长度对抗拉强度的影响，因此公式 (3) 可改写为公式 (4)。

$$\xi = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-k_v} = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{-k_A} \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-k_L} \quad (4)$$

式中： A 为构件的截面积， mm^2 ； L 为构件的受拉长度， mm ；下标“0”表示参考构件的尺寸参数。 k_A 、 k_L 分别是构件截面积、受拉长度的尺寸效应系数。

对公式 (1) 两边取两次对数得到公式 (5)。

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-p(\sigma)}\right)\right) = \ln V + \beta(\ln\sigma - \ln\alpha) \quad (5)$$

考虑某一失效概率， $p(\sigma)$ 为常数，对于某种材料， α 和 β 也为常数，公式 (5) 可进一步简化为公式 (6)。

$$\ln\sigma = -1/\beta \ln V \quad (6)$$

根据公式 (6)，强度 σ 的对数与构件体积 V 的对数呈线性关系，其斜率为 $-1/\beta$ ，即 $-k$ 。因此，通过对不同尺寸的多个试件进行强度测试，并拟合构件尺寸与强度之间的对数关系，可以根据拟合曲线的斜率确定尺寸效应系数。

2 结果与讨论

2.1 抗拉强度

有效试件的抗拉强度列于表2。使用Levene检验各组数据的方差齐性显示， P 值为0.17，即在 $\alpha=0.05$ 水平下各组试验数据满足方差齐性，因此可对每组数据进行单因素方差分析。结果表明，在 $\alpha=0.05$ 水平下，相同受拉长度或相同截面积组别的平均强度均存在显著差异，说明截面积和受拉长度对杨木重组木的抗拉强度有显著影响。

表2 不同尺寸高性能杨木重组木的抗拉强度

Tab.2 Tensile strength of high-performance poplar wood scrimber in different sizes

编号	截面积 A/mm^2	受拉长度 L/mm	抗拉强度 f/MPa		对数正态分布		有效数据点
			均值	变异系数/%	对数均值 μ/MPa	对数标准差 σ/MPa	
A1	2 700	600	69.8	11.2	4.240	0.115	17
A2	1 600	600	69.9	10.2	4.242	0.102	16
A3	800	600	72.7	10.8	4.281	0.101	19
A4	400	600	79.8	14.6	4.370	0.141	18
A5	200	600	81.3	16.3	4.387	0.150	18
A6	800	900	71.3	9.8	4.263	0.097	15
A7	800	300	78.8	11.4	4.360	0.113	16
A8	800	150	81.7	12.6	4.395	0.123	16

大量试验结果表明，足尺试件的强度分布接近于对数正态分布^[6]，其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad x > 0 \quad (7)$$

式中： μ 为对数均值； σ 为对数标准差。

采用极大似然法，用对数正态分布估计各组数据的分布参数（表2），之后采用参数法，计算强度分布的19个百分位数（5%、10%、15%、…、80%、85%、90%、95%）。以抗拉强度百分位数的对数值为纵坐标，分别以试件的体积、受拉长度和截面积等的对数为横坐标，进行线性回归分析，直线的斜率即该百分位数对应的体积、受拉长度和截面积的尺寸效应系数。

2.2 尺寸效应

2.2.1 体积尺寸效应 按1.5节方法，将不同百分位数的强度和试件尺寸绘制于对数坐标系中进行线性拟合，得到强度和尺寸的一次函数，其斜率的相反数即为该百分位数强度对应的尺寸效应系数。图2给出三个关键百分位数的拟合关系曲线。

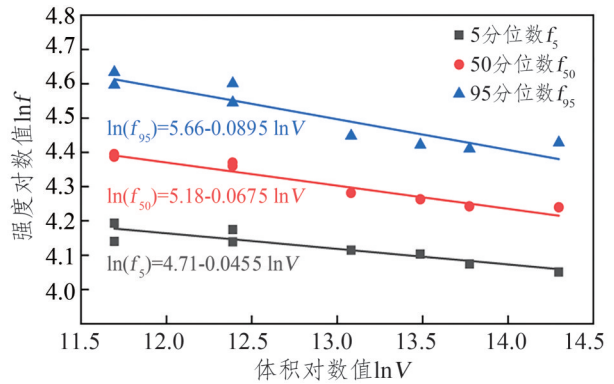


图2 不同百分位数强度与试件体积的对数关系拟合曲线
Fig.2 Logarithmic relationship fitting curves between strength at different percentiles and specimen volume

根据拟合结果，5分位数、50分位数和95分位数对应的体积尺寸效应系数分别为0.045 5、0.067 5和0.089 5，表明不同百分位数的尺寸效应系数存在差异，高百分位数对应的尺寸效应系数更大，说明在较高强度水平下，材料强度对尺寸的敏感性更强。

按照上述方法计算不同百分位数的体积尺寸效应系数，绘制体积尺寸效应系数与百分位数的关系图，如图3所示。

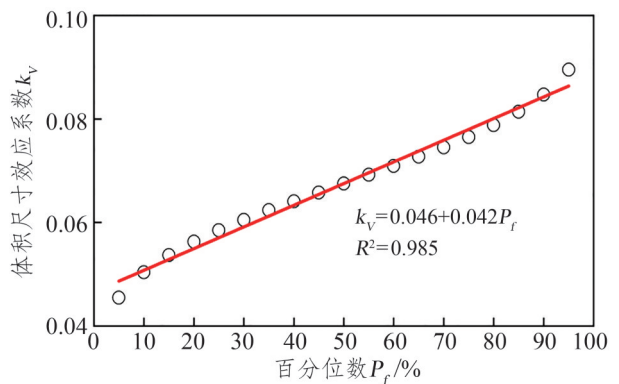


图3 抗拉强度百分位数与体积尺寸效应系数的关系
Fig.3 Relationship between percentiles of tensile strength and volume effect coefficient

通过方程回归分析，高性能杨木重组木试件抗拉强度的体积尺寸效应系数 k_v 与百分位数 P_f 之间近似线性关系（式8）。

$$k_v = 0.046 + 0.042P_f \quad (8)$$

统计检验发现斜率显著不同于零（ $P < 0.001$ ），说明体积尺寸效应具有强度敏感性，高性能杨木重组木的抗拉强度体积尺寸效应系数随百分位数的增加呈显著的线性上升趋势。

2.2.2 受拉长度尺寸效应 按照上述方法计算不同百分位数的受拉长度尺寸效应系数, 绘制其与百分位数的关系图, 如图4所示。

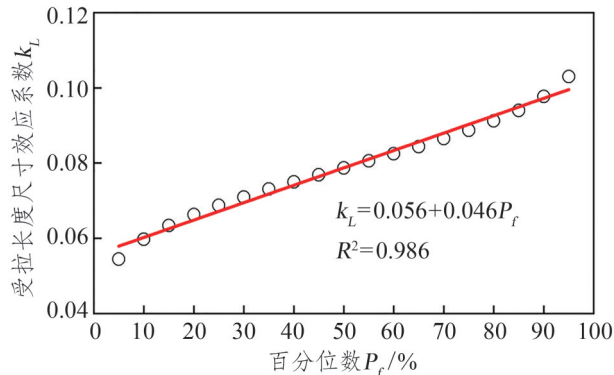


图4 抗拉强度百分位数与受拉长度尺寸效应系数的关系
Fig.4 Relationship between percentiles of tensile strength and tensile length effect coefficient

方程回归分析结果发现, 高性能杨木重组木试件抗拉强度的受拉长度尺寸效应系数 k_L 与百分位数 P_f 之间近似线性关系(式9)。

$$k_L = 0.056 + 0.046P_f \quad (9)$$

统计检验发现斜率显著不同于零($P < 0.001$), 说明受拉长度尺寸效应也具有强度敏感性, 即高性能杨木重组木的抗拉强度受拉长度尺寸效应系数随百分位数的增加呈上升趋势。

2.2.3 截面积尺寸效应 截面积尺寸效应系数与百分位数的关系, 如图5所示。

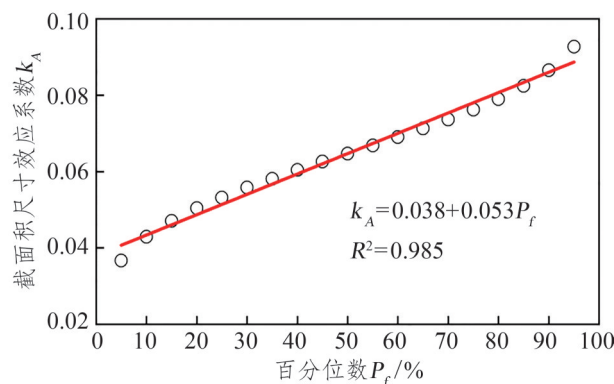


图5 抗拉强度百分位数与截面积尺寸效应系数的关系
Fig.5 Relationship between percentiles of tensile strength and cross-sectional area effect coefficient

方程回归分析结果表明, 高性能杨木重组木试件抗拉强度的截面积尺寸效应系数 k_A 与百分位数 P_f 之间近似线性关系(式10)。

$$k_A = 0.038 + 0.053P_f \quad (10)$$

高性能杨木重组木的截面积尺寸效应同样具有强度敏感性, 其抗拉强度截面积尺寸效应系数随百分位数的增加呈上升趋势。

2.2.4 不同尺寸效应系数的比较 受拉长度尺寸效应系数 k_L 平均值为0.0787, 截面积尺寸效应系数 k_A 平均值为0.0647, 而体积尺寸效应系数 k_V 平均值为0.0675, 介于 k_L 和 k_A 之间。说明不同维度上的尺寸效应系数并不相同, 不能简单采用 k_V 来描述高性能杨木重组木的尺寸效应系数。

对于不同的抗拉强度百分位数, 受拉长度尺寸效应系数大于截面积尺寸效应系数。一方面说明截面积和受拉长度方向尺寸效应不同, 应予以区分对待; 另一方面说明在受拉长度和截面积维度上, 高性能杨木重组木构件受拉失效机制有所不同。在垂直于轴线方向, 各个单元并联排列, 某一单元失效时, 荷载可传递至相邻单元, 造成应力重新分布, 构件不会立即破坏; 而在受拉长度方向, 某一截面一旦失效, 构件将立即破坏。因此受拉长度尺寸效应系数略大于截面积尺寸效应系数。

2.3 抗拉强度折减系数

选用尺寸较小的试件作为基准, 便于实验室测试, 以获取材料的基准强度, 从而推算大尺寸构件的强度。因此, 研究以受拉尺寸最小的A8组试件作为基准, 大尺寸构件的强度可以根据公式(4)计算。对于工程材料, 通常采用5分位数作为强度代表值或特征值, 因此根据拟合结果(图3~5), 分别取0.041、0.047和0.058作为截面积、体积和受拉长度的尺寸效应系数。计算得出抗拉强度折减系数与尺寸比值(指大尺寸构件的特征尺寸, 即截面积、体积和受拉长度与A8组基准试件对应特征尺寸之比)的关系, 如图6所示。

图6显示, 抗拉强度折减系数随受拉长度增大时减小最快, 随截面积增大时减小最慢。此外, 随着尺寸比值的增大, 抗拉强度折减系数趋于稳定。考虑到抗拉强度折减系数随截面积和受拉长度变化的差异, 不应仅考虑体积变化单一指标, 而应分别考虑截面积和受拉长度的比值。基于这两个维度指标, 提出高性能杨木重组木强度特征值的抗拉强度折减系数计算公式(式11)。

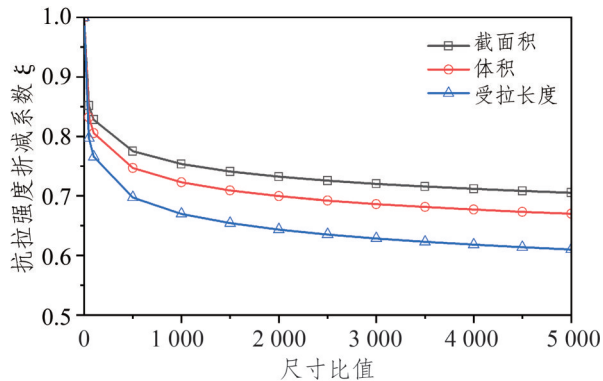


图6 抗拉强度折减系数与尺寸比值的关系

Fig.6 Relationship between the tensile strength reduction factor and the size ratio

$$\xi = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{-0.041} \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-0.058} \quad (11)$$

式中： A_0 、 L_0 取A8组基准试件的截面积和受拉长度，分别为 800 mm^2 、 150 mm 。

受拉长度和截面积的尺寸效应系数差异反映了高性能杨木重组木在不同维度上失效机制的差异性，提出的抗拉强度折减系数计算公式综合考虑了这些差异，可为高性能杨木重组木工程设计提供参考和依据。

3 结论

1) 高性能杨木重组木（密度约为 0.9 g/cm^3 ）抗拉强度存在明显的尺寸效应，抗拉强度随受拉长度和截面积的增大而减小（ $P < 0.05$ ）。

2) 高性能杨木重组木抗拉强度的受拉长度尺寸效应系数 k_L （平均值0.078 7）略大于截面积尺寸效应系数 k_A （平均值0.064 7），体积尺寸效应系数 k_V （平均值0.067 5）介于 k_L 和 k_A 之间。

3) 高性能杨木重组木抗拉强度的 k_V 、 k_L 和 k_A 均对强度敏感，不同百分位数（5%~95%）的尺寸效应系数不同，分别满足线性关系 $k_V = 0.046 + 0.042P_f$ （ $R^2 = 0.985$ ）、 $k_L = 0.056 + 0.046P_f$ （ $R^2 = 0.986$ ）和 $k_A = 0.038 + 0.053P_f$ （ $R^2 = 0.985$ ）。

4) 综合考虑受拉长度与截面积对尺寸效应的影响差异，构建一种适用于高性能杨木重组木的抗拉强度折减系数计算方法，通过耦合二者的双重尺寸效应，为工程设计提供量化计算依据和理论支撑。

参考文献：

- [1] 张亚慧, 齐越, 黄宇翔, 等. 我国高性能重组木材料制备技术开发与应用及未来发展[J]. 木材工业, 2018, 32(2): 14-17.
ZHANG Y H, QI Y, HUANG Y X, et al. Manufacturing technology, application and future development of high-performance wood scrimber in China[J]. China Wood Industry, 2018, 32(2): 14-17.
- [2] 于文吉. 我国重组材料科学技术发展现状与趋势[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 1-7.
YU W J. Current status and future trend of science and technology for reconstituted materials in China[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 1-7.
- [3] MADSEN B. Structural behavior of timber[M]. North Vancouver, British Columbia: Timber Engineering Ltd., 1992.
- [4] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials[R]. Royal Swedish Institute for Engineering Research, 1939: 45.
- [5] BOHANNAN B. Effect of size on bending strength of wood members [R]. Madison: Forest Products Laboratory, Forest Service, Department of Agriculture, US, 1966.
- [6] BARRETT J D, LAU W. Canadian lumber properties[M]. Ottawa, Ontario Canada: Canadian Wood Council, 1994.
- [7] 周海宾, 王学顺. 落叶松锯材抗弯强度尺寸效应[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 117-120.
ZHOU H B, WANG X S. Size effect of bending strength of Chinese larch lumber[J]. Journal of Civil, Architecture and Environmental Engineering, 2013, 35(1): 117-120.
- [8] 赵秀, 吕建雄, 江京辉, 等. 结构用规格材抗弯强度的尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 734-737.
ZHAO X, LYU J X, JIANG J H, et al. Size effect of modulus of rupture for the larch dimension lumber[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4): 734-737.
- [9] 赵荣军, 王丽, 张俊珍, 等. 单板层积材顺纹抗拉与抗压强度的尺寸效应分析[J]. 木材工业, 2016, 30(3): 38-40, 48.
ZHAO R J, WANG L, ZHANG J Z, et al. Analysis of size effect on longitudinal tensile and compressive strength of laminated veneer lumber[J]. China Wood Industry, 2016, 30(3): 38-40, 48.
- [10] 龚迎春, 叶琦, 武国芳, 等. 国产落叶松正交胶合木顺纹抗压强度尺寸效应[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(1): 42-46.
GONG Y C, YE Q, WU G F, et al. Effect of size on compressive strength parallel to the grain of cross-laminated timber made with domestic Larch[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(1): 42-46.
- [11] 赵培焱, 张新培. 结构用重组竹弯曲强度和剪切强度的尺寸效应研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 184-190.
ZHAO P Y, ZHANG X P. Study on the size effect of bending strength and shear strength of structural reconstituted bamboo[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 184-190.
- [12] ZHANG H, LI H, HONG C, et al. Size effect on the compressive strength of laminated bamboo lumber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(7): 04021161.
- [13] XIE P, LIU W, HU Y, et al. Size effect research of tensile strength of bamboo scrimber based on boundary effect model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 239: 107319.
- [14] ZHAO P, ZHANG X. Size effect of section on ultimate compressive strength parallel to grain of structural bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 586-590.
- [15] THELANDERSSON S, LARSEN H J. Timber engineering[M]. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2003.
- [16] 李天娥. 基于可靠度要求的木材强度设计值确定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

(本文编校 向琴)