北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响

李 施江靖 陈红 吴智慧 季加贵 胡永茂

Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components

Li Zhezhe, Shi Jiangjing, Chen Hong, Wu Zhihui, Ji Jiagui, Hu Yongmao

引用本文:
李, 施江靖, 陈红, 吴智慧, 季加贵, 胡永茂. 竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):168-176. doi: 10.12171/j.1000-1522.20240360
Li Zhezhe, Shi Jiangjing, Chen Hong, Wu Zhihui, Ji Jiagui, Hu Yongmao. Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):168-176. doi: 10.12171/j.1000-1522.20240360

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240360

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

榫卯结构弯曲破坏时声发射衰减特性与源定位

Acoustic emission attenuation and source location on the bending failure of the rectangular mortise-tenon joint for wood structures

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 107-111. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20160150

孔洞对木梁弯曲应变分布影响的试验研究

Experimental study on the effects of holes on bending strain distribution of wood beams

北京林业大学学报, 2017, 39(11): 106-113. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170221

竹材薄壁组织拉伸性能及其变异规律的研究

Tensile properties and its variation pattern of bamboo parenchyma

北京林业大学学报, 2020, 42(11): 130-137. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200203

预处理方法对玉米秸秆人造板性能的影响

Effects of pretreatment methods on properties of corn straw board

北京林业大学学报, 2017, 39(9): 112-118. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170069

木质素基聚电解质薄膜的制备及其力学性能

Preparation of lignin-based polyelectrolyte film and its mechanical properties

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 125-133. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180281

含三唑复合防腐剂及其竹处理材的金属腐蚀性能

Metal corrosion performance of triazole-containing compound preservatives and treated bamboo

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 128-136. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20190232

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240360

竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响

李喆喆[1]　施江靖[2]　陈　红[1]　吴智慧[1]　季加贵[3]　胡永茂[3]
（1. 南京林业大学家居与工业设计学院，江苏 南京 210037；2. 南京林业大学材料科学与工程学院，江苏 南京 210037；
3. 浙江三箭工贸有限公司，浙江 丽水 323800）

摘要:【目的】竹材因其自身结构差异（如非对称性弯曲行为），在相同工艺条件下制备的弯曲构件品质不稳定。本研究旨在探索不同部位竹条在不同弯曲模式下的成型规律，以提高竹条弯曲构件制备的可控性，并为其工艺优化提供科学依据。**【方法】**采用一体式弯曲成型工艺，研究竹青侧受压（Type Ⅰ）和竹黄侧受压（Type Ⅱ）两种弯曲模式下，竹秆不同部位（基部、中部、梢部）竹条的弯曲性能以及弯曲构件的弯曲合格率、最小弯曲半径范围和弯曲稳定性。**【结果】**竹秆中部竹条的纤维体积分数最高，基部次之，梢部最低，且竹条的弯曲性能与纤维体积分数呈正相关。在相同部位，Type Ⅰ模式下竹条的弯曲强度和模量高于 Type Ⅱ模式，但 Type Ⅱ模式下竹条的弯曲韧性更高。Type Ⅱ模式更易于成功制备弯曲构件，并可实现更小的弯曲半径。相比基部与梢部，中部竹条制备的弯曲构件的弯曲合格率更高，中部竹条在 Type Ⅱ模式下的最小弯曲半径（R）范围为 30 mm < R ⩽ 60 mm。弯曲构件的弯曲稳定性与竹条的纤维体积分数呈负相关，具有最高纤维体积分数的中部竹条弯曲构件回弹角最大。**【结论】**竹秆不同部位的竹条在径向弯曲载荷作用下表现出显著的非对称性弯曲行为。在制备竹条弯曲构件时，可根据所需弯曲程度选择合适的竹秆部位和弯曲模式。使用中部竹条并采用 Type Ⅱ模式，能够有效提高弯曲构件的合格率和性能稳定性，尤其适用于制备弯曲程度较高的构件。

关键词：竹材；弯曲构件；非对称性弯曲行为；弯曲成型；纤维体积分数；弯曲稳定性；力学性能；结构特性
中图分类号：S781.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)04−0168−09
引文格式：李喆喆，施江靖，陈红，等. 竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：168−176. Li Zhezhe, Shi Jiangjing, Chen Hong, et al. Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 168−176.

Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components

Li Zhezhe[1]　Shi Jiangjing[2]　Chen Hong[1]　Wu Zhihui[1]　Ji Jiagui[3]　Hu Yongmao[3]
(1. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
3. Zhejiang Sanjian Industry & Trade Co., Ltd, Lishui 323800, Zhejiang, China)

Abstract:［**Objective**］The quality of curved components produced under identical process conditions exhibits instability due to the structural heterogeneity of bamboo, such as its asymmetric bending behavior. This study aimed to explore the forming regulations of bamboo strips derived from different parts of bamboo culms under varied bending modes, aiming to enhance the controllability of producing bamboo strip curved components and to provide a scientific foundation for process optimization.［**Method**］A one-piece bending forming process was employed to fabricate curved components. The bending properties of bamboo strips from different parts of bamboo culms were investigated under two bending modes, namely compression on

收稿日期: 2024−10−31　**修回日期:** 2024−12−02
基金项目: 浙江省博士后基金二等资助项目（ZJ2022170）。
第一作者: 李喆喆。主要研究方向：绿色竹家居材料。Email：lizhezhe@njfu.edu.cn　地址：210037 江苏省南京市玄武区龙蟠路 159 号南京林业大学家居与工业设计学院。
责任作者: 陈红，博士，副教授。主要研究方向：绿色竹家居材料、竹家具制造工艺。Email：chenhong@njfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

bamboo outer layer (Type Ⅰ) and compression on bamboo inner layer (Type Ⅱ). Additionally, the bending pass rate, minimum bending radius range, and bending stability of curved components were also examined. [**Result**] The fiber volume fraction of bamboo strips was the highest in the middle part, followed by the root part, and the lowest in top part. Additionally, there was a positive correlation between bending properties of bamboo strips and their fiber volume fraction. For the same parts of bamboo culms, the bending strength and modulus of bamboo strips were higher under Type Ⅰ mode compared with those under Type Ⅱ mode, while bamboo strips under Type Ⅱ mode exhibited higher bending toughness. Bamboo strip curved components were more likely to be successfully bent and shaped when compressed under Type Ⅱ mode rather than Type Ⅰ mode, resulting in achieving smaller bending radii. The bending pass rate of curved components fabricated from the middle part of bamboo strips was higher compared with that of root and top part of bamboo strips, and the minimum bending radius of the middle part of bamboo strips was in the range of 30 mm < R ≤ 60 mm when they were bent under Type Ⅱ mode. The bending stability of curved components was negatively correlated with fiber volume fraction of bamboo strips, and the middle bamboo strip curved components with the highest fiber volume fraction exhibited the largest springback angle. [**Conclusion**] Bamboo strips from different parts of bamboo culm exhibit significant asymmetric bending behavior under radial bending loads. When fabricating bamboo strip curved components, bamboo strips from different parts of bamboo culms and bending modes can be selected according to the desired degree of bending, in which the use of bamboo strips in the middle of bamboo culms under Type Ⅱ mode can effectively produce curved components with higher degree of curvature.

Key words: bamboo; bending components; asymmetric bending behavior; bending forming; fiber volume fraction; bending stability; mechanical properties; structural properties

竹材是一种具有复杂多级结构和特殊分子力学现象的生物复合材料[1]。在宏观尺度上，竹材由厚壁竹纤维组成的维管束作为增强相，以薄壁多孔的基本组织作为基体相，是一种典型的天然纤维增强复合材料。在竹壁径向上，靠近竹青部位维管束分布密集且尺寸较小，靠近竹黄部位分布稀疏且尺寸较大，并且从竹青到竹黄，维管束的数量逐渐减少。在竹秆纵向上，维管束密度从基部至梢部逐渐增大，尺寸逐渐减小[2]。这种独特梯度结构赋予竹材优异的力学性能，尤其是弯曲柔韧性，使其在建筑、家居、装饰和包装等领域广泛应用[3]。

竹秆从基部至梢部具有周期性分布的竹节，竹节由秆环、箨环和节隔组成，起到加强竹秆直立和水分横向输导作用[4]。随着竹秆高度增加，竹秆直径和竹壁厚度均呈减小趋势，节间长度在竹秆高度约 1/2 处达到最大值[5]。作为可再生的功能梯度材料，竹材节间的维管束在竹壁径向上呈现梯度结构分布于薄壁组织之间[6]。同时，其弯曲性能也表现出梯度变化，靠近竹青处弯曲性能远高于靠近竹黄处，并在中间部分逐渐过渡[7]。竹壁中维管束的梯度分布导致竹材密度和孔隙率呈现梯度变化[8]。维管束从竹青到竹黄的形状和尺寸差异对定向弯曲柔韧性起着关键作用，维管束的梯度分布致使其在竹黄侧弯曲载荷作用下呈现出良好的弯曲延展性[9]。然而，竹材梯度结构赋予其非对称性的弯曲行为如何影响竹家具或竹制品中弯曲构件的制备与性能，仍需进一步研究。深入探究竹材非对称性弯曲行为对于竹弯曲制品的制备和性能的影响，对拓展其在建筑、家居、装饰和包装等领域的应用具有重要意义。

目前，竹家具弯曲构件成型主要有加压弯曲和锯制弯曲两大类。加压弯曲是指通过模具将竹条等直线形材料纵向弯曲获得异形单元，再利用螺栓、榫卯和胶等方式连接构成零部件，其中弯曲胶合是加压弯曲中的一种，它将叠涂胶黏剂的竹条或竹片按要求配成一定厚度的板坯，然后放在特定的模具中加压弯曲和胶合制成各种曲线形零部件[10]。这种方法是在胶合板生产工艺和实木方材弯曲技术基础上发展而来的[11]。锯制弯曲是通过细木工带锯或线锯等切削竹集成材等材料为毛料，并经过铣削获得所需的弧形或异形零部件。虽然锯制弯曲操作简单，但由于大部分纤维被横向切断，在结构上导致其构件韧性较低且难以涂饰[12]。因此，目前竹家具中主要采用加压弯曲方式制备异形构件。

竹材弯曲构件的成型效果受弯曲构件的结构、工艺参数及含水率等因素影响。现有研究多集中在软化处理、加热温度、干燥定型等工艺方面，较少考虑竹材本身结构差异，导致采用相同工艺时，因竹秆不同部位及竹青侧和竹黄侧结构不同，制备的弯曲

构件品质不一。此外，目前主要采用分步工艺，即软化处理、弯曲成型和干燥定型各自进行，较少有将三者合并为一体的综合工艺，而综合工艺对于提升生产效率、降低成本至关重要。因此，本研究以竹秆基部、中部和梢部制备的竹条为研究对象，分别对竹青侧受压（Type Ⅰ）和竹黄侧受压（Type Ⅱ）两种弯曲模式进行弯曲性能测试，并采用软化处理、弯曲成型和干燥定型一体式弯曲成型工艺制备弯曲构件，旨在探究不同部位竹条在不同弯曲模式下的成型规律，以提高竹条弯曲构件制备的可控性，并为其工艺优化提供指导。

1 材料与方法

1.1 材 料

毛竹（*Phyllostachys pubescens*）产自浙江庆元，5 年生。竹材选用离地 0.2 ~ 8.5 m 处的竹秆，平均胸径 10 cm，气干待用。基部选用离地 0.2 ~ 2.2 m 的竹秆，中部选用 2.2 ~ 6.2 m 的竹秆，梢部选用 6.2 ~ 8.2 m 的竹秆（如图 1）。竹秆不同部位定长开条后，经过竹壁两侧等厚切削，加工成 500 mm（纵向，LD）× 20 mm（横向，TD）× 4 mm（径向，RD）的竹条，含水率控制在 8% ~ 12%。

1.2 竹条弯曲构件制备

采用一体式弯曲成型工艺制备竹条弯曲构件。具体步骤如下：将 3 根未施胶的竹条放置于模具中（图 1）；将竹条置于设备成型区，通过热源在模具中的流动传递热量，使竹条加热至 100 ~ 110 ℃；随后，利用模具部件的加载实现对竹条的外驱弯曲定型，同时完成软化处理、弯曲成型和干燥定型，设定的弯曲角度为 90°，成型时间为 4 min，机器压力为 0.92 MPa。

试样采用两种不同的弯曲模式进行成型：竹青侧受压弯曲为 Type Ⅰ模式，竹黄侧受压弯曲为 Type Ⅱ模式。弯曲半径分别设置为 30、60 和 70 mm，以探究不同弯曲模式和半径对竹条弯曲成型的影响。

1.3 测试与表征

1.3.1 纤维体积分数

本研究选取基部、中部和梢部的竹秆，分别取 6 组样本进行竹壁厚度测量。首先，使用 320 目砂纸（PROXXON，德国）对竹条试样的横切面进行打磨处理，确保表面平整。随后，利用平板式影像扫描仪（PERFECTION V850 PRO，EPSON，日本）在 8 位灰度模式下以 9 600 ppi 的分辨率对试样横切面进行扫描，获取横截面图像。接着，将扫描得到的图像导入 Photoshop 软件进行处理，对图像进行二值化处理，勾勒出维管束纤维鞘的边缘轮廓，提取其像素点，并通过这些像素点计算纤维体积分数等相关信息。每组样本重复测试 20 次，以确保数据的可靠性。最后，使用 IBM SPSS Statistics 25 软件对数据进行单因素方差分析。

1.3.2 弯曲性能

本研究采用万能力学试验机（WH-5000，上海精密，中国）对竹条的弯曲性能进行测试，测试过程严格参照 GB/T 15780—1995《竹材物理力学性质试验方法》[13]进行，并记录试样的断裂形貌。测试试样的尺寸为 160 mm（LD）× 10 mm（TD）× 4 mm（RD），跨距设置为 64 mm。试验中采用径向加载方式，确保在（1 ± 0.5）min 内使试样破坏。具体弯曲模式分为两种：试样竹青侧受压弯曲为 Type Ⅰ模式，试样竹黄侧受压弯曲为 Type Ⅱ模式。试验机的载荷传感器量程为 5 kN，测试速度控制在 10 ~ 15 mm/min。通过测试，获取两种弯曲模式下试样的弯曲强度、弯曲模量和弯曲韧性。其中，弯曲模量的取值区间为最大载荷的 10% ~ 40%，弯曲韧性则通过计算直至失效点（降至最大载荷的 40% 时）的应力−应变曲线下的面积来确定。为了确保数据的可靠性，每组试样均进行了 10 次重复测试。

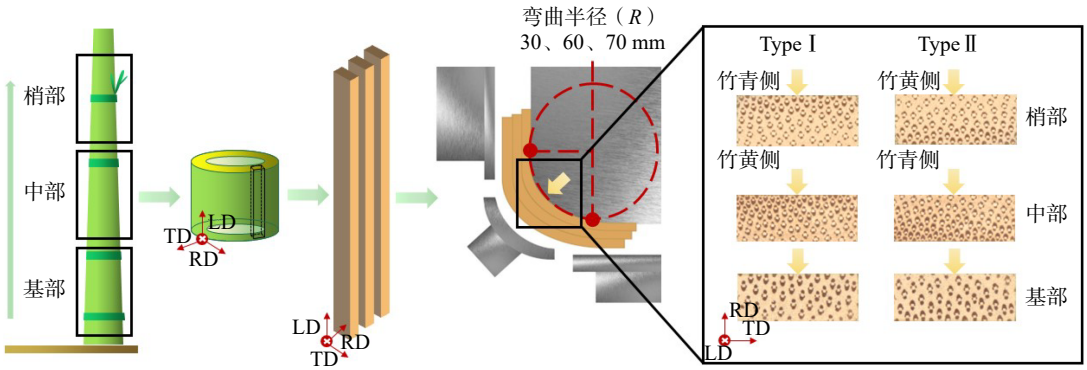


图 1 竹条弯曲构件的制备流程

Fig. 1 Preparation process of bamboo strip curved components

1.3.3　弯曲合格率与稳定性

在进行竹条弯曲构件的合格率测试时，首先记录每个竹条弯曲构件的弯曲情况。如果弯曲构件完好无损，未出现竹纤维撕裂、竹条断裂等损坏现象，并且能够良好贴合模具，则记录为数字“1”；反之，若弯曲构件不能很好地贴合模具且发生了破坏现象，则记录为数字“0”。对弯曲实验中数字“1”和数字“0”的频率进行统计，每组试样重复测试 20 次。当数字“1”出现的频率超过 90% 时，表明该组弯曲构件能够达到该弯曲半径值，即为弯曲构件的可弯曲半径。

为了进一步评估弯曲构件的形貌和稳定性，使用平板式影像扫描仪(PERFECTION V850 PRO, EPSON, 日本)在彩色模式下以 3 200 ppi 的分辨率对竹条弯曲构件进行扫描。在弯曲构件从模具中取出后，立即记录其脱模后的角度。此外，将弯曲构件放置在温度为 28 ℃、湿度为 50% 的环境中一周，并记录其一周内弯曲角度的变化，以计算回弹角。每组试样重复测试 20 次，使用 IBM SPSS Statistics 25 对回弹角数据进行多因素方差分析，以确定纤维体积分数(21.31%、25.34% 和 19.11%)、竹条位置(内层、中层和外层)和弯曲半径(60 和 70 mm)对回弹角的影响。

2　结果与讨论

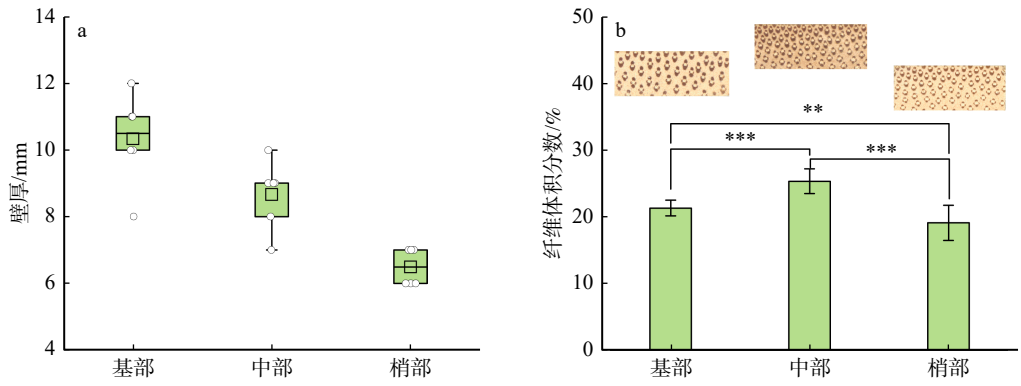
2.1　竹秆不同部位竹条的可加工性与纤维体积分数

图 2a 显示基部、中部和梢部的竹壁厚度分别为 8 ~ 12 mm、7 ~ 10 mm 和 6 ~ 7 mm。随着竹秆高度的增加，竹壁厚度逐渐降低，这种厚度的减小也相应地削弱了竹材的可加工性。竹条中的维管束形态主要为半开放型和开放型[14]，且 3 个部位竹条的维管束分布密度均呈现出从竹青侧向竹黄侧逐渐减少的趋势。3 个部位竹条的纤维体积分数分别为 21.31%、25.34% 和 19.11%，彼此之间存在显著差异($P<0.01$)。基部和梢部竹条的纤维体积分数相近，而中部竹条的纤维体积分数最高(图 2b)。这种结构变化会对竹条的弯曲性能产生显著影响[8]。

2.2　竹秆不同部位竹条的非对称性弯曲行为

从图 3a 的弯曲应力−应变曲线可以看出，在 Type Ⅰ模式下，竹条断裂前的弯曲应变较小。这主要是因为在此弯曲模式下，维管束含量较多的竹青部位承受压应力，而受拉侧的竹黄部位含有更多的薄壁组织，这增加了应变的不均匀性，并提高了裂纹萌生的可能性，从而导致试样的形变能力较低[15]。相比之下，在 Type Ⅱ模式下，竹条断裂前的弯曲应变较大。这是因为竹黄部位的薄壁组织能够承受较大压应力造成的压缩变形。此外，薄壁组织在轴向压缩下的横向膨胀可以有效地保持维管束的轴向排列，并防止其出现大尺寸裂纹扩展[16]。

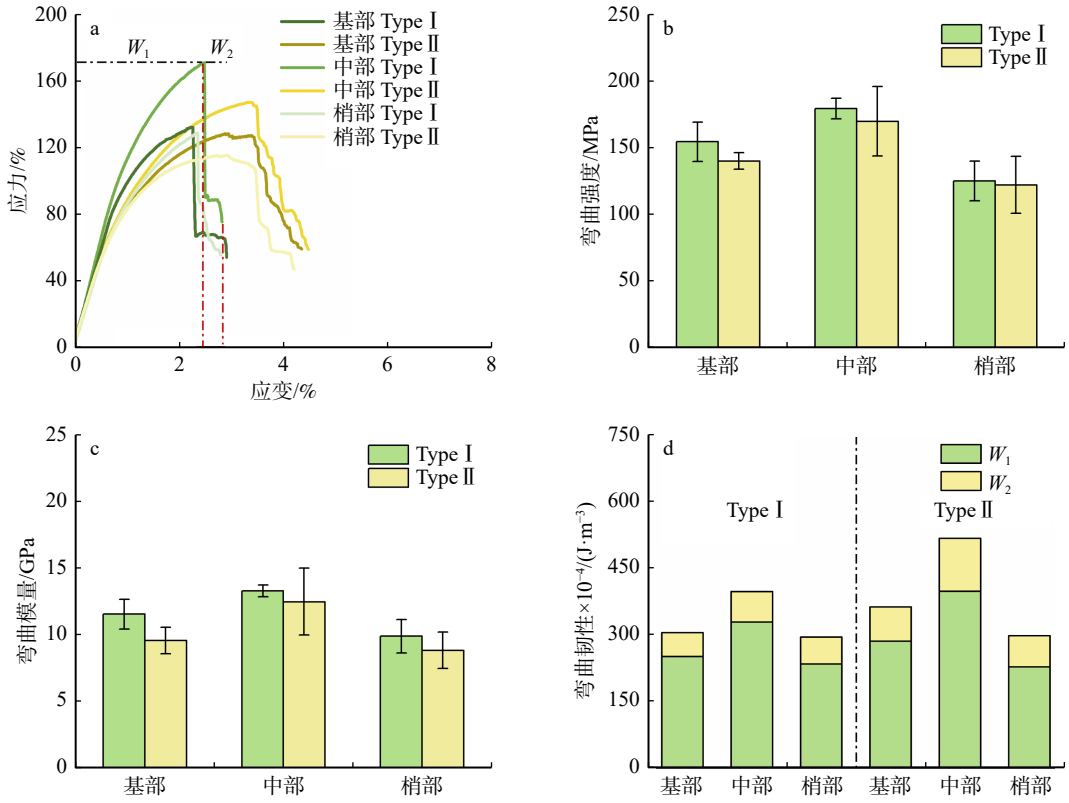
无论是 Type Ⅰ模式还是 Type Ⅱ模式，竹条的弯曲强度、弯曲模量和弯曲韧性从基部到梢部的变化趋势与纤维体积分数的变化类似，均呈现先增加后降低的趋势(图 3b ~ d)。中部竹条表现出最大的弯曲强度、弯曲模量和弯曲韧性，这表明其弯曲性能与纤维体积分数存在正相关关系。W_1(应力−应变曲线弹塑性阶段曲线下面积)和 W_2(应力−应变曲线断裂阶段曲线下面积)分别表示竹条在弹塑性阶段和断裂阶段所吸收的能量[17]。从图 3d 可以看出，竹条的弯曲韧性中 W_1 均明显高于 W_2，这表明竹条在弯曲成型时能够吸收大量的能量而不断裂；对于不同弯曲模式，中部竹条的 W_1 均明显高于基部和梢部竹条。当竹条的竹秆部位相同时，Type Ⅰ模式下竹条的弯曲强度和弯曲模量均高于 Type Ⅱ模式，但基部和梢部竹条 Type Ⅰ模式的弯曲韧性却低于 Type Ⅱ模式。这表明与 Type Ⅰ模式相比，Type Ⅱ模式下竹条吸收的能量更多。因此，在热压弯曲成型时，可以推断采用 Type Ⅱ模式可能更容易成功。



*、**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平下的显著性差异。

图 2　竹秆不同部位的壁厚(a)和不同部位竹条的纤维体积分数(b)

Fig. 2　Wall thickness of different parts of bamboo culms (a) and fiber volume fraction of bamboo strips in different parts (b)



W_1 为应力–应变曲线弹塑性阶段曲线下面积，W_2 为应力–应变曲线断裂阶段曲线下面积。

图 3 竹秆不同部位竹条的弯曲应力–应变(a)、弯曲强度(b)、弯曲模量(c)与弯曲韧性(d)

Fig. 3 Bending stress-strain (a), bending strength (b), bending modulus (c), and bending toughness (d) of bamboo strips with different parts of bamboo culms

2.3 竹秆不同部位竹条的非对称性弯曲断裂机制

竹条在不同弯曲模式下的弯曲断裂机制存在显著差异。研究显示在 Type Ⅰ模式下，竹条的薄壁组织在弯曲载荷作用下率先发生破坏，当裂纹扩展至维管束时，会沿着维管束与薄壁组织之间的弱界面进行扩展和偏转(见图 4a)。这种现象主要归因于竹黄部位含有较高比例的薄壁组织，而薄壁组织的拉伸强度相对较低[16]。相比之下，在 Type Ⅱ模式下，竹条的断口呈现锯齿状(见图 4a)。这是由于维管束含量较高的竹青部位受到拉伸应力，而维管束本身具有较高的拉伸强度[18]，维管束从薄壁组织中拔出，并且在维管束与薄壁组织之间的弱界面处产生大量分层[19]，从而进一步增加了界面断裂现象[16]。

竹条的非对称性弯曲变形如图 4b 所示。在 Type Ⅰ模式下，竹条受拉层的薄壁组织含量较高，其拉伸性能远低于维管束[18]。当受到拉应力时，薄壁组织容易遭受破坏，并且产生的裂纹可能沿着细胞长轴或短轴方向扩展，从而形成较大的裂纹，这不利于弯曲构件的制备。而在 Type Ⅱ模式下，竹条受压层主要由薄壁组织构成，薄壁细胞具有壁薄腔大的结构特点，在受到压力作用时，细胞壁能够承受较大的变形而不破坏。同时，竹条受拉层的维管束含量较多，抵抗破坏的能力较强，从而延缓了竹条的失效。因此，在制备竹条弯曲构件时，明确竹条的弯曲方向至关重要。

2.4 竹条弯曲构件的弯曲合格率与最小弯曲半径

本研究通过 Type Ⅰ和 Type Ⅱ两种弯曲模式，分别制备了基部、中部和梢部的竹条弯曲构件(见表 1 和图 5)。研究发现，竹条弯曲构件的弯曲合格率随着弯曲半径的减小而降低，尤其是在弯曲半径(R)从 60 mm 降至 30 mm 时，所有试样的弯曲合格率均未达到 30%。在 Type Ⅱ模式下，中部试样的最小弯曲半径范围为 30 mm < R ⩽ 60 mm，而基部和梢部试样的最小弯曲半径范围均为 60 mm < R ⩽ 70 mm。相比之下，在 Type Ⅰ模式下，试样的弯曲破坏比例明显高于 Type Ⅱ模式，且所有试样的弯曲合格率均未达到 90%，表明该模式下弯曲成型的最小弯曲半径均大于 70 mm。这主要是因为竹条在 Type Ⅰ模式下的弯曲韧性低于 Type Ⅱ模式(见图 3d)，在弯曲成型时容易产生裂纹，导致弯曲成型难度较大(见图 5a、5b)。因此，采用 Type Ⅱ模式更容易成功制备弯曲构件。

在弯曲成型过程中，梢部试样更容易发生完全断裂，而基部和中部试样较少出现这种情况。此外，

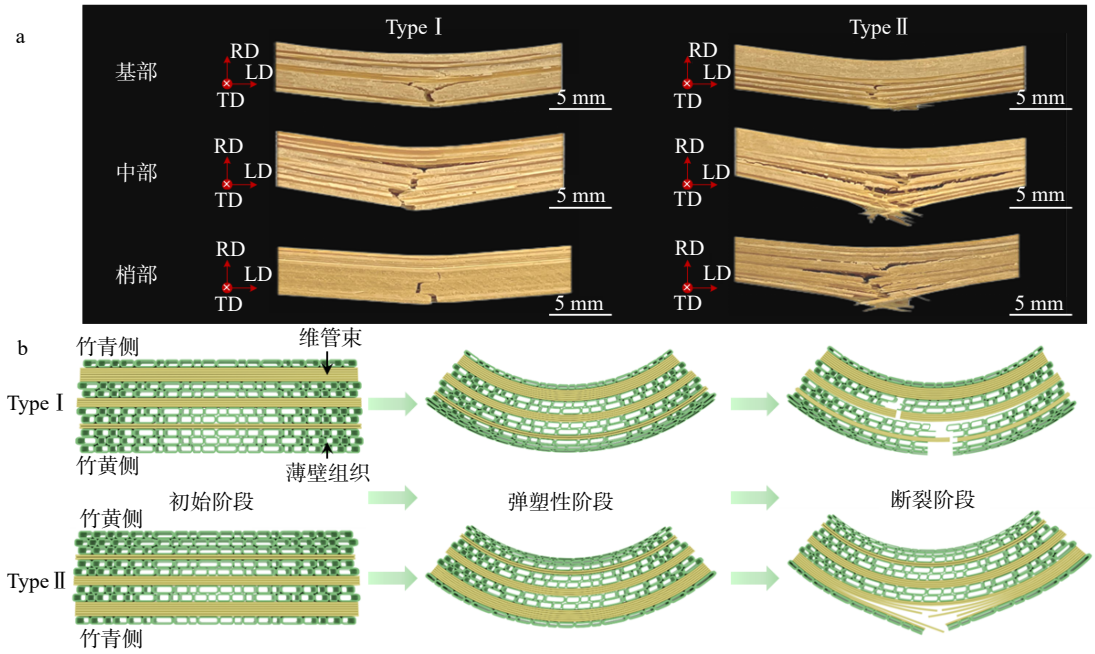


图 4　竹秆不同部位竹条的断裂形貌(a)和不同弯曲模式下竹条弯曲变形示意图(b)

Fig. 4　Fracture morphologies of bamboo strips with different parts of bamboo culms (a), and schematic diagram of bending deformation of bamboo strips under different bending modes (b)

表 1　竹秆不同部位的弯曲构件最小弯曲半径范围

Tab. 1　Minimum bending radius range of curved components of different parts of bamboo culms

部位	弯曲模式	弯曲半径(R)范围/mm
基部	Type Ⅰ	$R > 70$
	Type Ⅱ	$60 < R \leqslant 70$
中部	Type Ⅰ	$R > 70$
	Type Ⅱ	$30 < R \leqslant 60$
梢部	Type Ⅰ	$R > 70$
	Type Ⅱ	$60 < R \leqslant 70$

梢部试样出现的裂纹数量最多，其次是中部试样，基部试样最少。基部和梢部试样在竹节部位的断裂现象较为常见，这主要是因为基部和梢部的节间长度较短，单位长度内竹节较为密集[19]。先前的研究结果表明，在同样 2 m 长度的竹秆中，基部竹秆约有 11 个竹节，而中部和梢部竹秆分别约有 6 个和 7 个竹节[20]。由于竹节和节间的结构不同，竹节处的维管束纵横交错[21]，增加了弯曲成型的难度。同时，在竹条加工过程中，纵向刨切破坏了竹节部分纤维的连续性[22]，导致试样在弯曲时更容易在竹节处产生裂纹。

2.5　竹条弯曲构件的弯曲稳定性

图 6 展示了竹条弯曲构件在一周内的回弹变化情况。在最初的 48 h 内，弯曲构件的弯曲角度变化较为显著；而当陈放时间从 48 h 延长至 168 h 时，弯曲构件的弯曲角度变化相对较小。在同一弯曲半径下，中部弯曲构件的一周内回弹角度最大，基部弯曲构件次之，梢部弯曲构件的回弹角度最小。这种差异主要是由于中部竹条的纤维体积分数最大，其受拉层的维管束强度较高，抵抗变形的能力较强，从而导致中部弯曲构件具有较大的回弹角。相比之下，基部和梢部竹条的纤维体积分数较低，薄壁组织的比例增加，这些组织更容易发生变形，因此更有利于竹条在弯曲成型过程中发生变形和定型。

在同一试验中，弯曲设备一次弯曲 3 根试样。中层弯曲构件的回弹角大于内外层的弯曲构件。这是因为内外层的弯曲构件直接与传热模具接触，而中层弯曲构件则是通过内外层弯曲构件传递热量。由于中层弯曲构件受到的热量比内外层弯曲构件少，其回弹角度相对较大。此外，随着弯曲半径的增加，弯曲构件的回弹角也逐渐增大。例如，当弯曲半径为 70 mm 时，弯曲构件的回弹角度明显大于弯曲半径为 60 mm 的弯曲构件。

通过多因素方差分析(表 2)，研究了竹秆不同部位竹条的纤维体积分数、模具中的位置(内层、中层和外层)以及弯曲半径这 3 个变量对弯曲构件回弹角的影响。结果显示，竹秆不同部位竹条的纤维体积分数、模具中的位置和弯曲半径均对弯曲构件的回弹角产生显著影响($P < 0.001$)。

3　结　　论

本研究通过系统分析竹秆不同部位(基部 0.2 ~ 2.2 m、中部 2.2 ~ 6.2 m、梢部 6.2 ~ 8.2 m)和两种弯

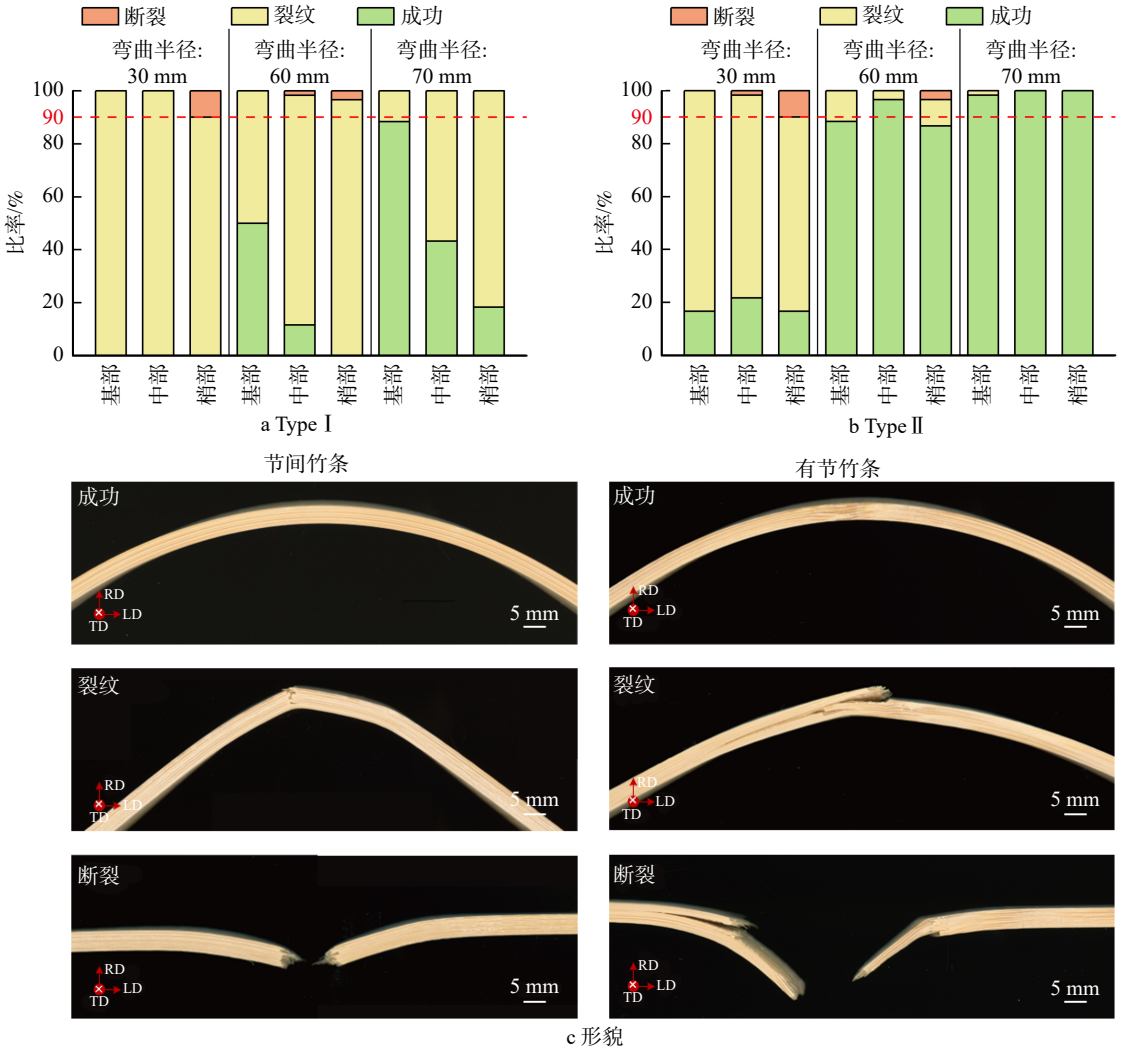


图 5 竹条弯曲构件的弯曲合格率与形貌

Fig. 5 Bending pass rate and morphologies of bamboo strip curved components

曲模式(Type Ⅰ和 Type Ⅱ)对竹条弯曲构件制备及性能的影响，揭示了竹材非对称性弯曲行为与弯曲构件性能之间的内在联系，为实现其高效生产和性能优化提供了关键依据。主要结论如下。

(1)竹条结构与弯曲性能的关联。研究表明，竹秆中部竹条的纤维体积分数最高，基部次之，梢部最低。纤维体积分数是影响竹条弯曲性能的关键结构因素，且与弯曲性能呈正相关。此外，竹条在不同部位均表现出明显的非对称性弯曲行为。对于同一部位竹条，在竹青侧受压(Type Ⅰ)模式下，竹条的弯曲强度和弯曲模量均高于竹黄侧受压(Type Ⅱ)模式，但弯曲韧性较低。这一发现为精准选择原材料和优化弯曲工艺提供了理论基础。

(2)弯曲模式的优化选择。在相同弯曲成型工艺参数下，Type Ⅱ模式制备的弯曲构件比 Type Ⅰ模式更容易成功，且可实现更小的弯曲半径。具体而言，Type Ⅱ模式下，基部、中部和梢部竹条的最小弯曲半径范围分别为 60 mm < R ≤70 mm、30 mm < R ≤60 mm 和 60 mm < R ≤ 70 mm。这一结果表明，Type Ⅱ模式在竹条弯曲加工中具有显著优势，能够有效提高弯曲构件的合格率和性能稳定性。

(3)回弹角的影响因素和优化策略。竹条弯曲构件的回弹角与其纤维体积分数呈正相关，中部竹条的回弹角最大。随着弯曲半径的增加，回弹角也相应增大。通过改进模具传热方式，可显著提升多层竹条同时弯曲成型的稳定性，从而优化弯曲构件的最终性能。这一发现为实际生产中减少回弹、提高产品质量提供了有效的技术指导。

综上所述，竹秆不同部位的竹条在径向弯曲载荷作用下表现出显著的非对称性弯曲行为。这一发现为竹条弯曲构件的高效制备提供了重要的理论依据。在实际生产中，可根据产品所需的弯曲程度，精准选择合适的原材料和弯曲模式，从而优化弯曲工艺，提高产品质量和生产效率。

然而，本研究仍存在一定的局限性。首先，研究主要集中在竹条的宏观结构特征(如纤维体积分数)

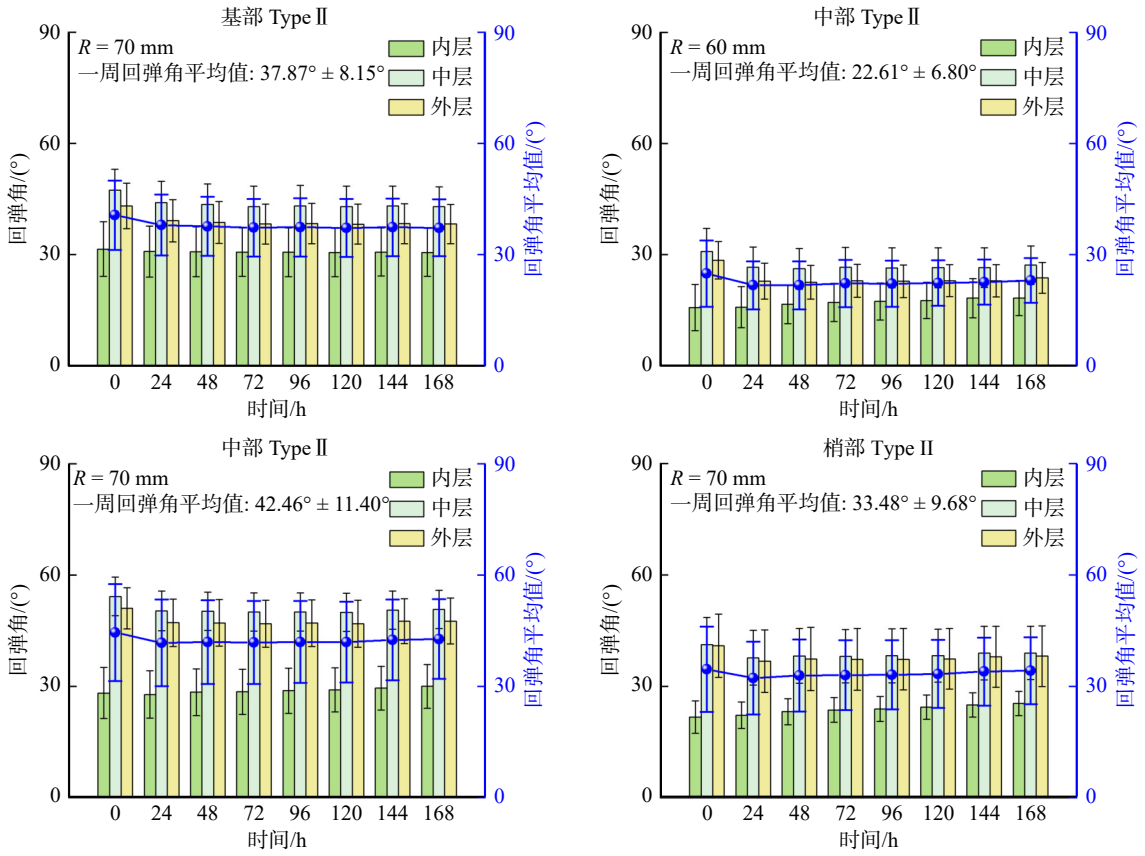


图 6　竹条弯曲构件的回弹角

Fig. 6　Springback angles of bamboo strip curved components

表 2　竹条弯曲构件回弹角受不同因素影响的方差分析

Tab. 2　Variance analysis on the springback angle of bamboo strip bending components influenced by different factors

变异来源	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值
纤维体积分数	2 417.330	2	1 208.665	32.779	< 0.001
竹条位置	6 661.065	2	3 330.532	90.323	< 0.001
弯曲半径	11 561.864	1	11 561.864	313.553	< 0.001
误差	8 296.583	225	36.874		
总变异	32 269.254	236			

对弯曲性能的影响，而对于微观结构（如细胞壁成分和纤维素结构）的作用机制尚未深入探讨。例如，通过调控竹材的细胞壁成分或纤维素结构，可以进一步优化其弯曲性能和耐久性。其次，虽然研究涉及了两种典型的弯曲模式，但在实际生产中可能存在更多复杂的弯曲场景，这些场景下的弯曲行为和优化策略仍有待进一步研究。此外，本研究的实验数据主要基于特定种类的竹材，对于其他竹种的普适性尚需进一步验证。

展望未来，深入探究竹材微观结构与弯曲性能之间的定量关系，将为优化竹材加工工艺提供更精准的科学依据。同时，拓展研究范围至更全面且复杂的弯曲场景（例如多向弯曲、动态弯曲等），并涵盖更多种类的竹材，将有助于开发适应性更强、效率更高的加工技术，从而生产出性能更优、质量更稳定的竹材产品。此外，结合竹条智能筛选与维管束智能识别等前沿智能制造技术，有望实现竹弯曲制品的模块化制造。这不仅能够进一步提升竹弯曲制品的品质和生产效率，还能降低生产成本、减少资源浪费，增强竹材产品在市场上的竞争力。通过这些技术创新，竹材有望在建筑、家居、装饰和包装等领域得到更广泛的应用，为推动可持续发展和绿色经济贡献更大的力量。

参　考　文　献

[1] Wegst U G K, Bai H, Saiz E, et al. Bioinspired structural materials[J]. Nature Materials, 2015, 14(1): 23−36.

[2] Li J, Xu H, Yu Y, et al. Intelligent analysis technology of bamboo structure (part I): the variability of vascular bundles and fiber

sheath area[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 174: 114163.

[3] Zhou B Z, Fu M Y, Xie J Z, et al. Ecological functions of bamboo forest: research and application[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(2): 143−147.

[4] Chen S M, Zhang S C, Gao H L, et al. Mechanically robust bamboo node and its hierarchically fibrous structural design[J]. National Science Review, 2022, 57(36): 195.

[5] Shima H, Sato M, Inoue A. Self-adaptive formation of uneven node spacings in wild bamboo[J]. Physical Review E, 2016, 93(2): 022406.

[6] 张晓冬, 程秀才, 朱一辛. 毛竹不同高度径向弯曲性能的变化 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2006, 30(6): 44−46.
Zhang X D, Cheng X C, Zhu Y X. Variation of bending performance with different location of bamboo[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2006, 30(6): 44−46.

[7] An Y L, Liu Z M, Wang G, et al. Three-point bending fracture behaviors of bamboo[J]. Advanced Materials Research, 2011, 261−263: 464−468.

[8] Wegst U G K. Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2011, 4(5): 744−755.

[9] Wei X, Zhou H, Chen F, et al. Bending flexibility of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) with functionally graded structure[J]. Materials, 2019, 12(12): 2007.

[10] 林乙煌, 李吉庆, 赖惟永, 等. 传统圆竹家具和新型竹集成材家具的分析 [J]. 龙岩学院学报, 2009, 27(5): 50−53.
Lin Y H, Li J Q, Lai W Y, et al. Analysis of traditional bamboo-culms furniture and new glue-laminated bamboo furniture[J]. Journal of Longyan University, 2009, 27(5): 50−53.

[11] 吴智慧, 李吉庆, 袁哲. 竹藤家具制造工艺学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 35−40.
Wu Z H, Li J Q, Yuan Z. Bamboo and rattan furniture manufacturing technology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 35−40.

[12] 杨晓梦, 柴源, 刘焕荣, 等. 基于不同竹单元的家具弯曲构件研究进展 [J]. 林产工业, 2019, 46(4): 20−24.
Yang X M, Chai Y, Liu H R, et al. The research progress of bending furniture components based on different bamboo units[J]. China Forest Products Industry, 2019, 46(4): 20−24.

[13] 国家标准化管理委员会. 竹材物理力学性质试验方法: GB/T 15780—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
Standardization Administration. Testing methods for physical and mechanical properties of bamboos: GB/T 15780−1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.

[14] Ray A K, Mondal S, Das S K, et al. Bamboo: a functionally graded composite-correlation between microstructure and mechanical strength[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(19): 5249−5253.

[15] Habibi M K, Samaei A T, Gheshlaghi B, et al. Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: underlying mechanisms[J]. Acta Biomaterialia, 2015, 16: 178−186.

[16] Wei X, Wang G, Smith L M, et al. Effects of gradient distribution and aggregate structure of fibers on the flexibility and flexural toughness of natural moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 853−863.

[17] Jiu C Z, Jie W, Chang Y L, et al. The study on in situ asymmetric bending behavior of structural bamboo materials under combined tension-bending loads[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57: 17304−17324.

[18] 安晓静. 竹子的多尺度拉伸力学行为及其强韧机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
An X J. Multi-scale tensile mechanical behavior and toughening mechanism for bamboo[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.

[19] Habibi M K, Lu Y. Crack propagation in bamboo's hierarchical cellular structure[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5598.

[20] Shi J J, Li Z Z, Chen H, et al. Optimizing processing strategies for eco-friendly bamboo curved components: insights from bamboo internode and node differences[J]. Industrial Crops & Products, 2024, 216: 118823.

[21] He Y Y, Xu H Q, Han S Y, et al. Toughness mechanism of the three-dimensional woven structure of bamboo node[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 210: 118136.

[22] Li X P, Ye H Z, Han S Y, et al. Effects of bamboo nodes on mechanical properties of thin-type bamboo bundle laminated veneer lumber (BLVL): from anatomical structure to penetration mechanism[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 203: 117−119.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）