

引用格式: 刘璇, 黄彬, 陈红, 等. 刨切方式和预处理对展平竹刨切单板结构与性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(3): 650–659. LIU Xuan, HUANG Bin, CHEN Hong, et al. Influence of cutting methods and pretreatment on the structure and performance of sliced bamboo veneers[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(3): 650–659.

## 刨切方式和预处理对展平竹刨切单板结构与性能的影响

刘璇<sup>1</sup>, 黄彬<sup>1</sup>, 陈红<sup>1</sup>, 连健昌<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 家居与工业设计学院, 江苏 南京 210037; 2. 龙竹科技集团股份有限公司, 福建 南平 354200)

**摘要:** 【目的】研究不同处理方式下不同径向位置展平竹刨切单板的结构与性能差异, 为实现“以竹代塑”和单板多样化利用提供基础数据。【方法】对比横向与纵向刨切方式及水煮预处理工艺, 采用表面质量、柔韧性、拉伸性能、化学成分作为评价指标, 研究不同处理方式对不同径向位置毛竹 *Phyllostachys edulis* 展平刨切单板理化性能的影响。【结果】横向刨切单板较纵向刨切单板表面质量及稳定性更高。从竹黄到竹青柔韧性逐渐变差。与横向刨切未水煮单板相比, 在相同径向位置上, 横向刨切水煮单板和纵向刨切单板的抗弯刚度分别增加 11.47% 和 34.22%, 柔韧性均变差。从竹黄到竹青刨切单板抗拉强度逐渐增强, 与纵向刨切单板相比, 相同径向位置横向刨切水煮/未水煮单板分别降低约 11.78% 和 21.68%。不同径向位置竹片的软化效果使梯度位置单板化学成分差异不明显, 结晶度从竹黄到竹青基本呈现上升趋势。【结论】单板不同力学性能受径向位置和刨切方向影响, 通过定向刨切和梯度化加工可有效协调单板力学性能。图 7 表 3 参 28

**关键词:** 展平竹; 径向位置; 刨切方式; 水煮预处理; 理化性能

中图分类号: S781.6 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)03-0650-10

## Influence of cutting methods and pretreatment on the structure and performance of sliced bamboo veneers

LIU Xuan<sup>1</sup>, HUANG Bin<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>1</sup>, LIAN Jianchang<sup>2</sup>

(1. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;  
2. Longzhu Technology Group Co., Ltd., Nanping 354200, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the structural and performance differences of sliced bamboo veneers from different radial positions under various treatments, so as to provide fundamental data for achieving “bamboo as a substitute for plastic” and diversified utilization of veneers. [Method] A comparative study was conducted on the transverse and longitudinal planing methods, as well as water-boiling pretreatment process. Surface quality, flexibility, tensile properties, and chemical composition were taken as evaluation indices to quantify the effects of different processing techniques on the physical and chemical properties of sliced bamboo (*Phyllostachys edulis*) veneers from different radial positions. [Result] Transverse planing yielded higher surface quality and stability than longitudinal planing. The flexibility gradually decreased from the inner bark to the outer bark of the bamboo. Compared with transverse-planed unboiled veneers at the same radial position, the flexural rigidity of transverse-planed boiled veneers and longitudinal-planed veneers increased by approximately 11.47% and 34.22%, respectively, while their flexibility both deteriorated. Conversely, the tensile strength of the sliced veneer increased from the inner bark to the outer bark of the

收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-11-16

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2023YFD2202100)

作者简介: 刘璇 (ORCID: 0009-0000-0599-3783), 从事绿色竹家居材料研究。E-mail: liu\_xuan@njfu.edu.cn。通信作者: 陈红 (ORCID: 0000-0001-7837-1803), 副教授, 博士, 从事绿色竹家居材料、竹家具制造工艺研究。E-mail: chenhong@njfu.edu.cn

bamboo. At the same radial position, the transverse-planed boiled and unboiled veneers showed reductions of 11.78% and 21.68%, respectively. Chemical compositions showed no significant variations across radial positions due to gradient-dependent softening effects, while the crystallinity basically showed an upward trend from the inner to the outer layers of the bamboo. [Conclusion] The mechanical properties of bamboo veneers vary with radial position and planing direction. Directional planing and gradient processing can effectively coordinate mechanical properties of veneers. [Ch, 7 fig. 3 tab. 28 ref.]

**Key words:** sliced bamboo; radial position; planing method; water-boiling pretreatment; physical and chemical properties

竹材作为可持续的生物物质资源, 具有生长迅速、可再生、碳汇能力强等优点, 符合绿色发展的时代要求<sup>[1-2]</sup>。作为高质化应用形式, 展平竹是指竹筒或弧形竹片经软化、展平、干燥、定型制成的片状材料, 能够使中空结构的竹材平板化, 提高竹质板材原材料利用率, 拓展竹质板材的应用领域。现有竹材展平技术在环保、低能耗的同时, 还能做到快速软化, 并且已从刻痕展平逐渐发展到无刻痕展平<sup>[3-5]</sup>, 板材质量和价值显著提升, 为后续开发应用提供了更多可能。依赖工业化的无刻痕竹展平技术, 可将展平竹刨切成具有一定幅面的片状材料, 极大地拓展了展平竹材的应用范围, 展平竹已从家具用材向家居用材转化。

根据材料刨切单板可分为竹集成材刨切单板、重组竹刨切单板和展平竹刨切单板。与传统竹集成材刨切单板相比, 展平竹刨切单板在保留竹材天然纹理的同时, 还具备无胶的环保属性。目前, 刨切单板以刨切竹集成材为主, 研究集中于应用设计和生产加工<sup>[6]</sup>, 在附加性能方面也存在一定理论研究。展平竹目前集中于应用研究, 如展平竹单板、复合材料和胶合板等性能研究<sup>[7-9]</sup>, 对于展平竹刨切单板的研究处于工艺优化阶段<sup>[10]</sup>。在展平竹制备过程中水热环境会影响后续材料的理化性能<sup>[11]</sup>, 刨切工艺对单板表面质量和力学性能有显著影响<sup>[12-14]</sup>。同时由于竹材径向上梯度结构差异<sup>[15]</sup>, 导致展平竹不同位置刨切下的单板物理力学性能存在差异。综上所述, 梯度位置和处理工艺决定了展平竹刨切单板性能, 会影响单板后续的生产成型与应用形式。因此, 本研究以不同径向位置的展平竹刨切单板为对象, 研究刨切方式、水煮处理对展平竹刨切单板结构和性能影响, 以期为后续单板生产利用提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

4~6年生毛竹 *Phyllostachys edulis*, 采自中国福建省南平市, 由福建龙竹科技集团股份有限公司加工。取离地 1.1 m, 长 1.5 m, 壁厚 11.5 mm 的基部竹材作为原料, 经剖分、软化、去青去黄、展平、刨切(横向刨切/纵向刨切)形成 0.4 mm 厚的单板。将部分单板经 80~90 °C 水煮清洗 60 min, 再统一进行干燥。

纵向刨切的单板经水煮清洗编号为 ZS, 横向刨切的单板经水煮清洗编号为 HS, 横向刨切的单板未经水煮清洗编号为 HW (表 1)。将刨切后的单板按照从竹黄到竹青的顺序, 挑选等距的单板, 分别编为 1、2、3、4、5 号。其中, 纵向刨切材料因受刨切设备限制, 有效刨切范围仅为横向刨切材料的一半, 故挑选等距的 3 片单板。

### 1.2 方法

1.2.1 表面形貌分析 通过电子显微镜 (SZM45T-LCD8) 和扫描电子显微镜 (Quanta 200) 对水煮和未水煮的、不同刨切方向的、不同径向位置的刨切单板的表面形貌、纤维和薄壁细胞形态进行观察, 探究表面质量的差异。

1.2.2 密度测定 将单板制备成 25 mm×25 mm 的试样, 径向位置 (1~5 号) 的 ZS、HS、HW 试样制备

表 1 样品编号示意

Table 1 Sample number diagram					
单板编号	径向位置(竹黄到竹青)				
	第1层	第2层	第3层	第4层	第5层
ZS	ZS-1	ZS-2	ZS-3	-	-
HS	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	HS-5
HW	HW-1	HW-2	HW-3	HW-4	HW-5

说明: “-”表示未制备该径向位置的试样。

6组对试样(每组至少2个平行样)。按照 GB/T 1578—1995《竹材物理力学性能实验方法》,测量试样不同梯度结构、不同刨切方向、不同处理方式的单板密度的变化情况,其中包括基本密度、绝干密度、12%含水率(气干)时的密度。

1.2.3 柔韧性测试 将单板制备成 800 mm×25 mm 的试样,每片单板制备 2 个平行样,径向位置(1~5号)的 ZS、HS、HW 试样各准备 6 组对试样(每组至少 2 个平行样)。按照 GB/T 18318.1—2009《纺织品弯曲性能的测定 第 1 部分:斜面法》,测量试样的抗弯刚度。每个试样测量两端和正反的弯曲长度,共 4 次,计算平均弯曲长度、抗弯刚度及变异系数,根据弯曲长度和单位面积质量计算抗弯刚度。

根据公式分别计算 2 个方向的平均单位宽度的抗弯刚度:  $G = m \times C^3 \times 10^{-3}$ 。其中:  $G$  为单位宽度的抗弯刚度 (mN·cm),精确至 0.001 mN·cm;  $m$  为试样的单位面积质量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $C$  为试样的平均弯曲长度 (cm)。

1.2.4 拉伸性能测试 将单板制备成 180 mm×15 mm 的试样,径向位置(1~5号)的 ZS、HS、HW 试样各准备 6 组对试样(每组至少 3 个平行样)。按照 GB/T 12914—2018《纸和纸板抗张强度的测定》制样,取材料节间部位 180 mm 作为试样,使夹持距离为 150 mm。将试样按照  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度拉伸,使其在 5~30 s 内断裂。根据有效样计算材料的拉伸性能。

1.2.5 纤维素晶型及结晶度测试 将不同径向位置(1~5号)的 HS 单板样品粉碎,使用 X 射线衍射仪(Ultima IV)检测样品的纤维素晶型以及结晶度。以粉末形式平铺于玻璃样品托上,每个样品制备 3 个试样。X 射线衍射仪以  $5^\circ \sim 35^\circ$ ,  $10^\circ \cdot \text{min}^{-1}$  的速度,用 Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ) 辐射源测量纤维素晶体结构,并且根据 Segal 公式计算相对结晶度。

1.2.6 化学成分质量分数测试 将不同径向位置(1~5号)的 HS 试样粉碎制备为竹粉,并进行绝干处理。根据美国可再生能源实验室(NERL)方法,用配备有 Aminex HPX-87H 柱(300.0 mm×7.8 mm)和折射率(RI)检测器的液相色谱仪(ICD-3000),并使用 1260 系统分析纤维和薄壁细胞中糖的质量分数,获得纤维素和半纤维素的质量分数。通过紫外分光光度计,用 205 nm 波长测得酸溶木质素的质量分数,用马弗炉测得酸不溶木质素的质量分数,最终得出木质素的质量分数。通过计算分析纤维素、半纤维素、木质素的质量分数,分析不同径向位置 HS 单板化学成分的差异。

## 2 结果与讨论

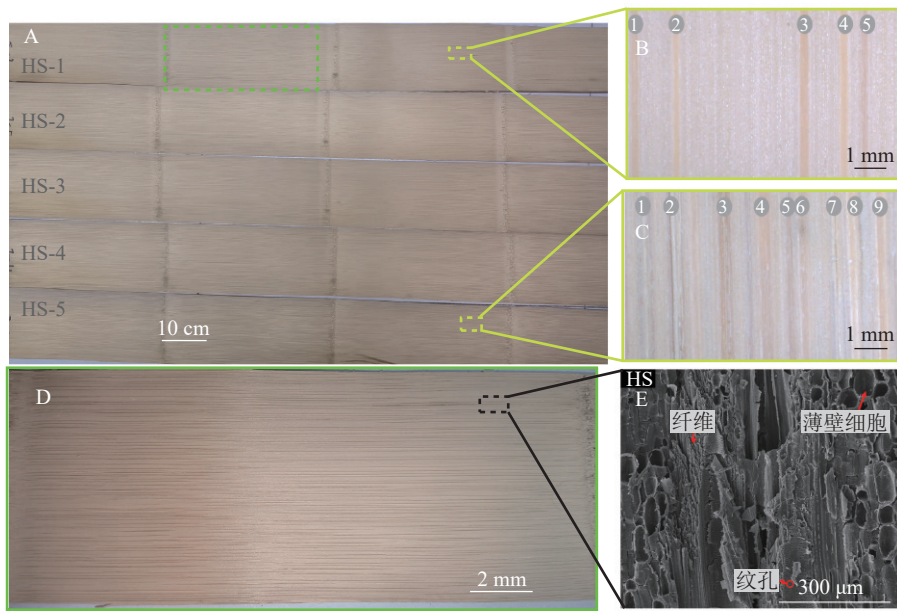
### 2.1 物理性能

2.1.1 表面形貌 横向刨切(HS)单板可以观察到竹黄侧维管束少(图 1A~C),表面更光洁平整(图 1B);横向刨切竹青侧维管束数量较多(图 1C),出现表面质量问题的概率变大。横向刨切刀具与竹材纤维走向形成一定夹角,且依赖薄木刨切机较小的刃倾角,刨切时纤维基本不会出现提前劈裂现象<sup>[16]</sup>,薄壁细胞部分受起翘纤维影响较小,通常表面平整光滑(图 1D、E)。

与横向刨切对比,纵向刨切(ZS)单板的表面质量较差,出现更多纤维毛刺,且不同径向位置单板表面质量不稳定(图 2A、B)。一方面,纵向刨切因刨切方向与纤维走向平行,部分纤维在未被刀具切断时提前劈裂被破坏,提前劈裂的纤维不仅对维管束区域刨切质量造成影响,引起纤维的翘起和毛刺现象,同时会影响周围薄壁组织的刨切质量和材料的光泽感等。另一方面,刀具的精度对于纵向刨切单板的表面效果影响较大,刀具使用次数过多或竹材靠近竹青部分硬度的提升,增加了刨切难度,容易造成刨切质量不佳,影响刨切质量的稳定性和光泽度。

不同刨切方向竹节部分的材料较节间部分表现出良好的刨切质量及稳定性(图 2C~H),较少有小毛刺等缺陷。维管束纵横交错的结构使其在纵向刨切时较节间部分更少出现纤维起翘现象,横向刨切在竹节和节间部分基本没有表面质量差异。

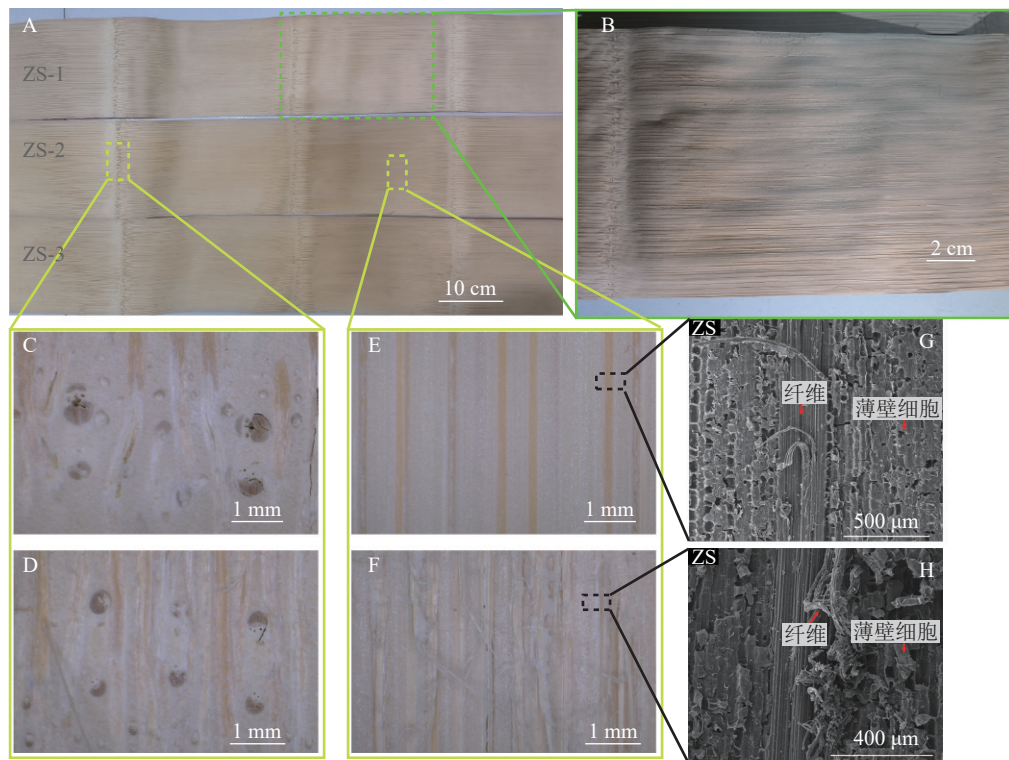
水煮清洗工艺对单板表面质量影响相对较小,但单板颜色有一定程度的改变。具体表现为经过水煮工艺处理后的单板颜色会变浅(图 3A),同时去除单板薄壁细胞内残留淀粉颗粒(图 3B~G)。软化工序对弧形竹片中的淀粉颗粒有一定影响,但未完全清除。通过  $80 \sim 90^\circ \text{C}$  的水浴清洗 60 min,充分去除内部淀粉残留,有效地提高了竹材的防霉性能<sup>[17-18]</sup>。同时,未水煮清洗的单板表面有部分因横向刨切断裂产生的细小纤维影响薄壁细胞部分的表面光泽,对比横向刨切水煮单板的表面,预处理很好地解决了这部分



A. 不同径向位置HS单板; B. HS-1细节图; C. HS-5细节图; D. HS-1宏观表面; E. HS-1微观表面。

图 1 HS 单板形貌

Figure 1 Morphology of HS sample



A. 不同径向位置ZS单板; B. ZS-1宏观表面; C、D. ZS-2竹节部分; E、F. ZS-2节间部分; G、H. ZS-2微观表面。

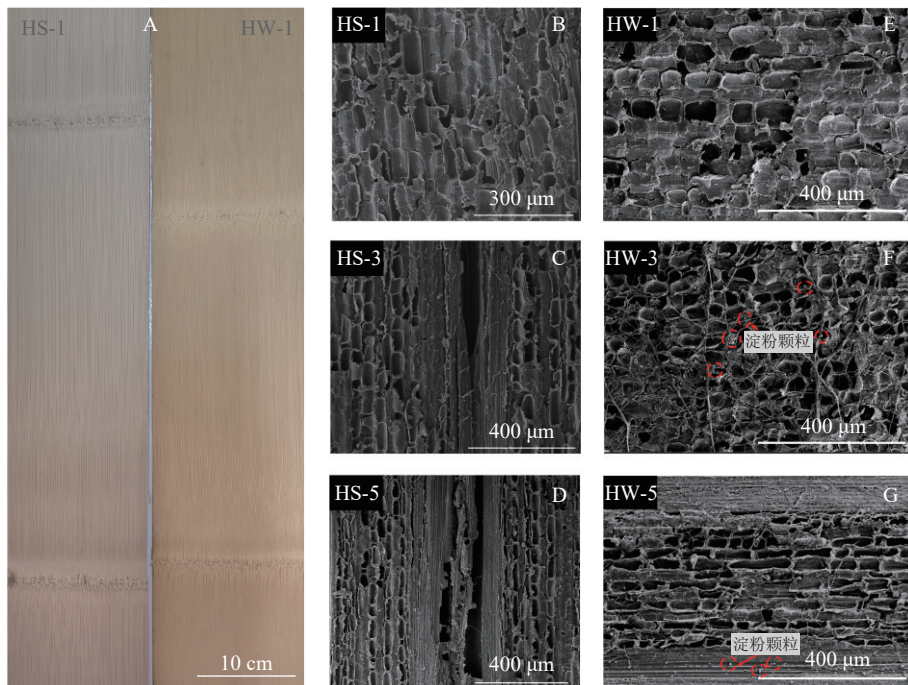
图 2 ZS 单板形貌

Figure 2 Morphology of ZS sample

影响表面质量的因素。

2.1.2 密度规律 单板密度从竹黄到竹青先稍微减小再增加(图 4A~C), 竹壁同一径向位置刨切下的单板中, HW 试样的密度最大, HS 试样密度减小约 11.03%, ZS 试样密度减小约 16.93%。展平竹刨切单板的基材展平竹, 是将弧形竹片无刻痕展平, 在展平过程中材料有一定致密化(图 4D)。弧形竹片靠近竹黄部分的材料维管束大而稀疏、孔隙较大, 在展平过程中竹黄部分受压严重, 靠近竹黄部分基本组织

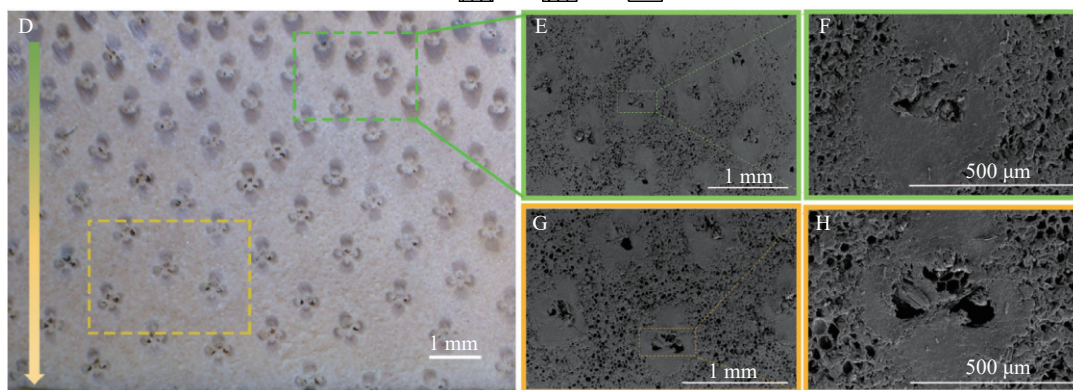
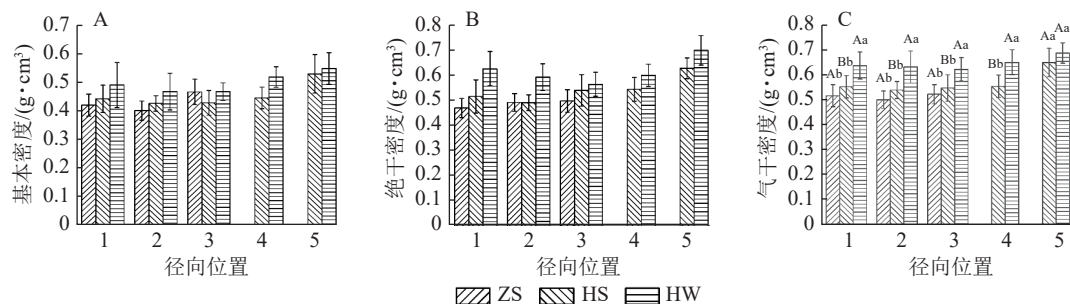
受压致密化程度大于竹青部分(图 E~H)<sup>[19-21]</sup>, 竹肉中密度更均匀化, 靠近竹黄部分和竹肉中部差异不显著, HS 试样竹青侧单板密度较其他部位差异显著 ( $P < 0.05$ )。水煮清洗和刨切方向对于密度的梯度变化规律基本没有影响, 水煮清洗会去除部分淀粉颗粒, 使材料密度较 HW 试样显著降低 ( $P < 0.05$ )。纵向刨切与横向刨切试样的密度有差异, 但差异不显著, 纵向刨切对表面质量的影响更大, 厚度尺寸误差更



A. HS与HW宏观表面; B~D. HS试样; E~G. HW试样。

图3 HS与HW对比图

Figure 3 Comparison chart of HS and HW



A. 基本密度; B. 绝干密度; C. 气干密度; D. 展平竹截面; E、F. 竹青侧展平竹微观构造; G、H. 竹黄侧展平竹微观构造。不同大写字母表示同一处理方式单板不同径向位置差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一径向位置不同处理方式差异显著 ( $P < 0.05$ )。

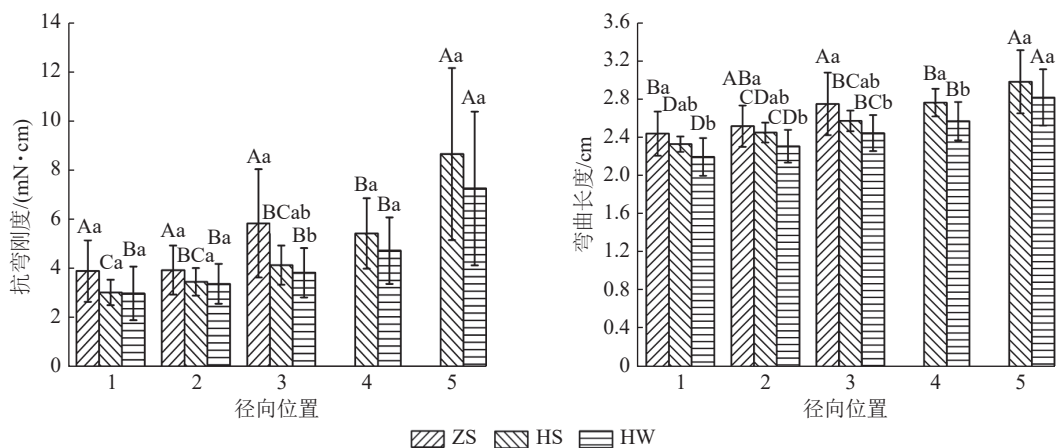
图4 展平竹截面及密度

Figure 4 Section and density of sliced bamboo

大, 同时纵向刨切造成的木毛现象可能导致厚度测量偏大, 是纵向刨切 (ZS) 单板密度小于横向刨切 (HS) 单板的主要原因。

## 2.2 柔韧性

展平竹壁从竹黄到竹青, 抗弯刚度呈递增趋势, HW 试样的抗弯刚度最小, HS 试样比 HW 试样增加 11.47%, ZS 试样抗弯刚度比 HW 试样增加 34.22% (图 5A)。抗弯刚度越大, 柔韧性越差。纵向刨切材料抗弯刚度较横向刨切材料更大, 柔韧性差, 特别是竹肉中部差异较大 ( $P < 0.05$ ); 水煮清洗处理对于柔韧性起负面作用, 经水煮清洗的横向刨切单板在同一梯度位置抗弯刚度增加约 11.47%, 但差异不显著。竹材从竹黄到竹青, 纤维束逐渐变小而密集, 纤维体积分数增加, 薄壁细胞占比减少, 材料弯曲变形空间减小, 柔韧性逐渐变差<sup>[22-23]</sup>。刨切方向带来柔韧性的差异, 可能是纵向刨切更多保留纤维的完整性, 弯曲时应力在纤维上传递, 容易应力集中, 柔韧性较横向刨切更差。抗弯刚度与单位面积质量和弯曲长度成正比, 受展平工序影响竹黄侧密度相对大于竹肉中部, 竹黄侧抗弯刚度差异不如弯曲长度差异明显 (图 5)。



A. 抗弯刚度; B. 弯曲长度。不同大写字母表示同一处理方式单板不同径向位置差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一径向位置不同处理方式差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 展平竹刨切单板柔韧性

Figure 5 Flexibility of sliced bamboo veneers

## 2.3 拉伸性能

对于横向刨切单板 (HW、HS), 抗拉强度从竹黄到竹青呈现逐步增加的趋势 ( $P < 0.05$ ), HS 试样从 70.3 MPa 增加到 128.7 MPa, HW 试样从 63.2 MPa 增加到 115.0 MPa; 纵向刨切单板 (ZS) 的抗拉强度随梯度变化的递增趋势不显著 (表 2)。维管束是竹材力学性能的主要来源<sup>[24]</sup>, 越靠竹青侧的单板维管束占比增加, 故竹青侧的单板抗拉强度更高, 抗拉强度呈梯度变化。ZS 在维管束逐渐密集时抗拉强度有所降低, 可能是因为增加的毛刺现象使拉伸时主要提供强度的有效体积减小。

同一梯度位置, ZS 的抗拉强度最高, HS 较 ZS 降低约 11.78%, HW 较 ZS 降低约 20.68% (表 2), 在靠近竹黄侧差异显著 ( $P < 0.05$ )。一方面, 水煮预处理可能促进纤维素分子链的重新排列, 形成更多结晶区域, 提高了材料的拉伸性能。另一方面, 刨切方向对于材料抗拉强度的影响, 可能是纵向刨切更好地保留了纤维的连续性, 因此 ZS 较 HS 的强度更高。此外, 同一片材不同位置的抗拉强度受纤维分布、刀具等影响会有一定差异。

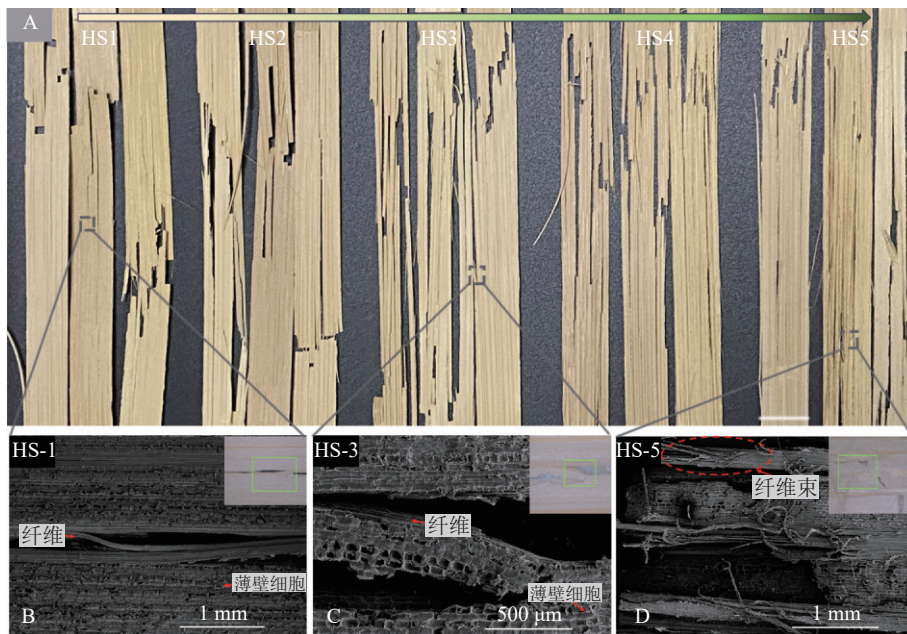
从竹黄到竹青, 单板拉伸破坏形态逐渐从脆性断裂到韧性断裂, 靠近竹青部分维管束更紧密, 常见纤维的撕裂, 拉伸裂纹更少集中在同一水平位置, 破坏形态更多是“W”形 (图 6A)。拉伸造成的破坏分布在材料的弱界面。维管束受刀具影响较大时, 被破坏处表现为裂纹沿着纤维方向延伸 (图 6B); 在维管束连续性较好的位置, 被破坏处可能沿着纤维和薄壁细胞的界面以及在强度较低的薄壁细胞中延伸 (图 6C); 在维管束较为完整紧实时, 大多是在薄壁细胞处被破坏以及表现为纤维的拔出 (图 6D)。在靠近竹黄部分, 维管束较为疏松且薄壁细胞占比更多, 单板基本在同一水平高度断裂。靠近竹青部分维管束更紧实, 受拉应力时维管束通常呈现整束拔出的状态, 同时维管束占比较多, 因此裂纹整体大多呈现极致的“W”形。

表2 抗拉强度

Table 2 Tensile strength

试材	不同径向位置抗拉强度/MPa				
	1	2	3	4	5
ZS	80.3±22.3 Aa	94.1±30.1 Aa	92.1±23.4 Aa	—	—
HS	70.3±18.1 Cab	77.9±22.5 Cab	86.9±25.4 BCa	105.8±28.3 ABa	128.7±52.9 Aa
HW	63.2±14.4 Cb	71.7±16.6 BCb	76.5±18.2 BCa	91.2±28.9 Ba	115.0±45.3 Aa

说明：“—”表示无此项。不同大写字母表示同一处理方式单板不同径向位置差异显著 ( $P < 0.05$ )，不同小写字母表示同一径向位置不同处理方式差异显著 ( $P < 0.05$ )。



A. HS试样拉伸破坏情况；B~D. HS试样拉伸破坏微观表面。

图6 单板拉伸破坏形式

Figure 6 Tensile failure mode of sliced bamboo veneer

## 2.4 化学成分

短时间的软化处理可能对于竹片中不同径向位置材料的影响程度不同，化学成分规律性变化不明显(表3)。半纤维素从竹黄到竹青先增加再减小，软化的湿热环境使HS-1的半纤维素降解更明显，较中部半纤维素质量分数有所降低。竹材纤维中纤维素、酸不溶木质素质量分数高于薄壁细胞，而薄壁细胞中半纤维素和酸溶木质素质量分数较高<sup>[25]</sup>。饱和蒸汽条件下，半纤维素中的乙酰基降解为乙酸，对纤维素稳定性造成影响<sup>[26]</sup>，同时纤维占比更多的部分纤维素质量分数更高，在不同梯度结构和不同程度半纤维素降解的影响耦合作用下，不同径向位置的HS试样纤维素质量分数分布规律不明显。酸溶木质素基本呈现减小趋势，归因于单板随梯度结构变化薄壁细胞占比减小。HS-1至HS-5纤维质量分数逐渐增加，

表3 HS试样的化学成分质量分数

Table 3 Chemical composition content of HS samples

样品编号	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%	酸不溶木质素/%	酸溶木质素/%
HS-1	41.17	20.90	28.36	25.98	2.38
HS-2	41.50	22.00	27.04	24.79	2.25
HS-3	41.45	21.74	27.47	25.26	2.21
HS-4	40.04	21.78	27.31	25.15	2.16
HS-5	40.67	18.49	29.87	27.73	2.14

木质素质量分数从 28.36% 增加到 29.87%; HS-1 木质素质量分数较竹肉中部有一定上升, 可能是软化导致 HS-1 的半纤维素降解明显, HS-1 木质素质量分数更高。

不同梯度结构单板的 X 射线衍射 (XRD) 图谱和结晶度 (Cr I) 如图 7 所示。生产工艺未改变材料的纤维素晶型, 从竹黄到竹青的单板结晶度在上升趋势中有一部分降低。单板的 (1-10) / (110)、(200) 和 (004) 晶面衍射峰分别位于 15.8°、22.1° 和 34.7° 附近, 表明经软化等生产工序的不同径向位置单板中纤维素的晶型为典型的纤维素 I 型。从竹黄到竹青, 单板的结晶度整体呈现上升趋势, 因为纤维的结晶度远大于薄壁细胞, 纤维占比从竹黄到竹青逐渐增加<sup>[27-28]</sup>。中部的结晶度小于靠近竹黄部分的结晶度, 可能是因为受软化工序影响较大的竹黄部分半纤维素相对含量减少, 干燥后形成更紧密的氢键网络, 结晶度相对上升。

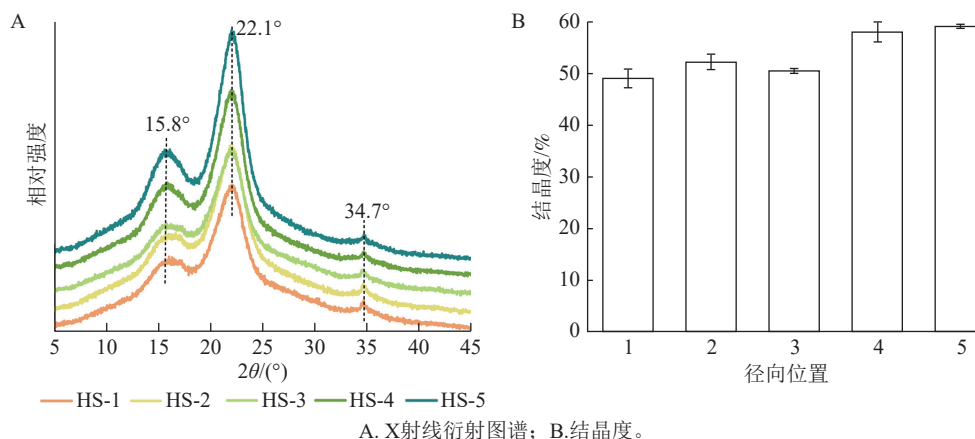


图 7 HS 试件的 XRD 图谱  
Figure 7 XRD pattern of HS samples

### 3 结论

本研究以展平竹刨切单板为研究对象, 研究不同刨切方式和水煮处理下不同径向位置单板的理化性能差异, 以期定向协调材料性能优势。主要结论如下: ①在物理性能方面, 刨切方式对单板表面质量影响最大。横向刨切效果更优且具有质量稳定性, 纵向刨切受径向位置影响, 竹青侧刨切难度增加。竹展平板密度均质化明显, 竹黄侧和竹肉中部差异较小, 水煮处理使单板密度平均降低约 11.03%。②在力学性能方面, 水煮处理和纵向刨切对拉伸性能起积极作用, 单板从竹黄到竹青拉伸性能逐步递增; 水煮处理和纵向刨切对柔韧性起消极作用, 单板从竹黄到竹青柔韧性呈递减趋势。③在化学成分方面, 展平竹生产工序使不同径向位置材料化学成分变化略微不同, 不改变纤维素晶型。从竹黄到竹青结晶度基本呈现递增趋势, 竹肉中部有一定下降。

### 4 参考文献

- [1] 李宏敏, 许鑫凯, 王雨桐, 等. 竹木结构建筑物化阶段碳排放量和碳汇评估[J]. *林产工业*, 2022, **59**(9): 64–68. LI Hongmin, XU Xinkai, WANG Yutong, *et al.* Assessment of carbon emission and carbon sink in the building stage of bamboo and wood structure[J]. *China Forest Products Industry*, 2022, **59**(9): 64–68. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202209012.
- [2] NAM B E, KIM J M, LEE S, *et al.* Estimation on individual-level carbon sequestration capacity of understory perennial herbs[J]. *Journal of Plant Biology*, 2024, **67**(3): 209–220. DOI: 10.1007/s12374-024-09422-y.
- [3] 张秀标, 刘焕荣, 张方达, 等. 纵向无刻痕一体化竹展平技术解析[J]. *林产工业*, 2021, **58**(2): 43–47. ZHANG Xiubiao, LIU Huanrong, ZHANG Fangda, *et al.* Analysis on the key technology of longitudinal, without grooves, integrated bamboo flattening[J]. *China Forest Products Industry*, 2021, **58**(2): 43–47. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202102010.
- [4] 李延军, 娄志超. 竹材展平技术研究现状及展望[J]. *林业工程学报*, 2021, **6**(4): 14–23. LI Yanjun, LOU Zhichao. Progress of bamboo flatten technology research[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, **6**(4): 14–23. DOI: 10.13360/j.

issn.2096-1359.202012021.

- [5] 陈李臻, 刘红征, 李延军, 等. 竹材无裂纹展平生产技术[J]. *林业科技通讯*, 2021(3): 53–55. CHEN Lican, LIU Hongzheng, LI Yanjun, *et al.* A study on manufacturing technique of crack-free flattened bamboo[J]. *Practical Forestry Technology*, 2021(3): 53–55. DOI: [10.13456/j.cnki.lykt.2020.03.29.0002](https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2020.03.29.0002).
- [6] 王军, 陈思宇, 潘荣, 等. 刨切薄竹在书籍装帧设计中的美学特征与设计创新[J]. *包装工程*, 2021, **42**(2): 173–179. WANG Jun, CHEN Siyu, PAN Rong, *et al.* Aesthetic features and design innovation of sliced bamboo veneer in book design[J]. *Packaging Engineering*, 2021, **42**(2): 173–179. DOI: [10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.027](https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.027).
- [7] 张秀标, 费本华, 江泽慧, 等. 竹展平板胶合性能研究[J]. *林产工业*, 2020, **57**(9): 16–19. ZHANG Xiubiao, FEI Benhua, JIANG Zehui, *et al.* Study on bonding performance of flatten bamboo panels[J]. *China Forest Products Industry*, 2020, **57**(9): 16–19. DOI: [10.19531/j.issn1001-5299.202009004](https://doi.org/10.19531/j.issn1001-5299.202009004).
- [8] ZHAO Yihan, MA Longchao, XIE Xiuying, *et al.* Mechanisms of two types of flattening treatments on the bonding characteristics of bamboo and the effect of laminate design on flexural properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, **408**: 133673. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.133673](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133673).
- [9] YUAN Tiancheng, XIAO Xiao, ZHANG Tao, *et al.* Preparation of crack-free, non-notched, flattened bamboo board and its physical and mechanical properties[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, **174**: 114218. DOI: [10.1016/j.indcrop.2021.114218](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114218).
- [10] 陈李臻, 李延军, 姜志超, 等. 展平竹刨切单板的生产工艺[J]. *木材工业*, 2021, **35**(1): 64–66. CHEN Lican, LI Yanjun, LOU Zhichao, *et al.* Manufacturing technology of sliced veneers from flattened bamboo boards[J]. *China Wood Industry*, 2021, **35**(1): 64–66. DOI: [10.12326/j.2096-9694.2020047](https://doi.org/10.12326/j.2096-9694.2020047).
- [11] FENG Yuan, WANG Qiuyi, XU Zhuchao, *et al.* Flexural properties of Moso bamboo induced by hydrothermal treatment[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, **222**: 119720. DOI: [10.1016/j.indcrop.2024.119720](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119720).
- [12] 尹健. 竹材铣削加工粉尘粒度和粒形分布特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022. YIN Jian. *Study on Particle Size and Shape Distribution Characteristics of Bamboo Milling Dust*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022. DOI: [10.27242/d.cnki.gnjlu.2022.000826](https://doi.org/10.27242/d.cnki.gnjlu.2022.000826).
- [13] 施金鹏. 面向新型竹片制备的机械设计及其竹片复合材料的表征研究[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024. SHI Jinpeng. *Machine Design for Manufacturing Novel Bamboo Slices and Preparation and Evaluation of Novel Bamboo Composite*[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science & Technology, 2024. DOI: [10.27840/d.cnki.gzjkj.2024.000232](https://doi.org/10.27840/d.cnki.gzjkj.2024.000232).
- [14] 李荣荣, 贺楚君, 彭博, 等. 毛竹材不同部位纤维形态及部分物理性能差异[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(4): 854–860. LI Rongrong, HE Chujun, PENG Bo, *et al.* Differences in fiber morphology and partial physical properties in different parts of *Phyllostachys edulis*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(4): 854–860. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20200649](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20200649).
- [15] WANG Fuli, SHAO Zhuoping. Study on the variation law of bamboo fibers' tensile properties and the organization structure on the radial direction of bamboo stem[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, **152**: 112521. DOI: [10.1016/j.indcrop.2020.112521](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112521).
- [16] 郭莹洁, 杨永福, 白雪. 铣削参数对毛竹超前劈裂的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2009, **31**(S1): 193–196. GUO Yingjie, YANG Yongfu, BAI Xue. Effects of milling parameters for Moso bamboo on its advance splitting[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, **31**(S1): 193–196. DOI: [10.13332/j.1000-1522.2009.s1.014](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2009.s1.014).
- [17] 董友明, 王娜, 薛秋霞, 等. 竹材防霉研究现状及展望[J]. *林业工程学报*, 2023, **8**(6): 24–32. DONG Youming, WANG Na, XUE Qiuxia, *et al.* Research progress and prospects in anti-mildew performance of bamboo[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2023, **8**(6): 24–32. DOI: [10.13360/j.issn.2096-1359.202302019](https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202302019).
- [18] WENG Beibei, WANG Zaigui, WANG Fuli, *et al.* Synergistic effect of Luffa seed oil and microwave treatment on the physicochemical properties of bamboo slices[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, **192**: 116033. DOI: [10.1016/j.indcrop.2022.116033](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116033).
- [19] 毛林海, 孔祥涛, 梁璞, 等. 竹材物理力学性质影响因素研究进展[J]. *世界竹藤通讯*, 2024, **22**(2): 91–97. MAO Linhai, KONG Xiangtao, LIANG Pu, *et al.* Research progress in factors influencing physical and mechanical properties of bamboo[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2024, **22**(2): 91–97. DOI: [10.12168/sjzttx.2023.11.10.002](https://doi.org/10.12168/sjzttx.2023.11.10.002).
- [20] HUANG Bin, JIA Hao, FEI Benhua, *et al.* Study on the correlation between the puncture impact performance of arc-shaped bamboo splits and bamboo ages[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, **186**: 115252. DOI: [10.1016/j.indcrop.2022](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022).

115252.

- [21] LUAN Yu, YANG Yuting, CHEN Lin, *et al.* Effects of integrated process of flattening and densification on the gradient structure and properties of Moso bamboo[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, **392**: 132073. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132073](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132073).
- [22] 陈复明, 何钰源, 魏鑫, 等. 竹材多尺度下强韧性及水热影响研究进展[J]. *林业工程学报*, 2023, **8**(4): 10–18. CHEN Fuming, HE Yuyuan, WEI Xin, *et al.* Advances in strength and toughness of hierarchical bamboo under humidity and heat[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2023, **8**(4): 10–18. DOI: [10.13360/j.issn.2096-1359.202207008](https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202207008).
- [23] 马弘帅. 竹材梯度结构对弯曲力学性能的影响[J]. *世界竹藤通讯*, 2020, **18**(3): 50–54. MA Hongshuai. The influence of bamboo gradient structure on flexure modulus[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2020, **18**(3): 50–54. DOI: [10.12168/sjzttx.2020.03.009](https://doi.org/10.12168/sjzttx.2020.03.009).
- [24] 李明鹏, 李文婷, 王翠翠, 等. 基于响应面法研究梁山慈竹材梯度结构理化性能的相关性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, **41**(7): 165–172. LI Mingpeng, LI Wenting, WANG Cuicui, *et al.* Study on the correlation of physical and chemical properties of *Dendrocalamus farinosus* gradient structure based on response surface methodology[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, **41**(7): 165–172. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.07.020](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.07.020).
- [25] CHEN Hong, WU Jieyu, SHI Jiangjing, *et al.* Effect of alkali treatment on microstructure and thermal stability of parenchyma cell compared with bamboo fiber[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, **164**: 113380. DOI: [10.1016/j.indcrop.2021.113380](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113380).
- [26] WANG Xinzhou, CHENG Dali, HUANG Xianai, *et al.* Effect of high-temperature saturated steam treatment on the physical, chemical, and mechanical properties of Moso bamboo[J]. *Journal of Wood Science*, 2020, **66**(1): 52. DOI: [10.1186/s10086-020-01899-8](https://doi.org/10.1186/s10086-020-01899-8).
- [27] CHEN Hong, WU Jieyu, SHI Jiangjing, *et al.* Strong and highly flexible slivers prepared from natural bamboo culm using NaOH pretreatment[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, **170**: 113773. DOI: [10.1016/j.indcrop.2021.113773](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113773).
- [28] 牛思杰, 王娜, 崔百祥, 等. 不同竹龄和部位对毛竹纤维形态及结晶度的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(2): 446–452. NIU Sijie, WANG Na, CUI Baixiang, *et al.* Effects of different ages and positions on fiber morphology and crystallinity of *Phyllostachys edulis*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(2): 446–452. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220749](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220749).