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

顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征

李芸琪 初石民 林兰英 傅峰

Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading

Li Yunqi, Chu Shimin, Lin Lanying, Fu Feng

引用本文:
李芸琪, 初石民, 林兰英, 傅峰. 顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9):143–152. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250136
Li Yunqi, Chu Shimin, Lin Lanying, Fu Feng. Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):143–152. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250136

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250136

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

水分对木材细胞壁孔隙结构影响研究进展
Research progress on the effect of water on pore structure of wood cell wall
北京林业大学学报, 2024, 46(2): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230243

轻木细胞壁超微结构与力学性能关系研究
Relationship between cell wall ultrastructure and mechanical properties of balsa wood
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 115–122. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210410

水分引发的木材细胞壁无定形物质对纤维素结晶结构的影响
Water–induced effects of matrix in wood cell wall on cellulose crystalline structure
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 121–131. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220150

不同预处理方法对木材细胞壁孔隙结构影响
Effects of different pretreatment methods on the pore structure of wood cell wall
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 140–151. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230158

不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性
Tensile creep characteristics of compression wood and normal wood under different temperatures and loads
北京林业大学学报, 2024, 46(12): 138–145. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240277

金佛山方竹细胞构成、形态及细胞壁层构造变异性
Variability of cell composition, morphology and cell wall structure in *Chimonobambusa utilis*
北京林业大学学报, 2022, 44(9): 146–157. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220197

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250136

顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征

李芸琪 初石民 林兰英 傅 峰
（中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091）

摘要:【目的】木材作为具有天然多尺度结构的工程材料，常因受外部载荷作用而发生失效破坏。尽管多尺度结构对木材破坏具有决定性影响，但目前对不同尺度结构的破坏特征及其对失效破坏的影响机制仍缺乏系统性阐释。本研究旨在阐明杨木细胞结构与排列方向在顺纹拉伸载荷下诱发的多尺度失效破坏特征，为木材力学性能评价与工程应用提供理论依据。**【方法】**以人工林意大利杨为对象，截取轮内不同区域制备拉伸试样。结合 SEM、AFM 等显微表征手段，系统比较生长轮、细胞及细胞壁 3 个尺度结构单元的构造特征与力学性质差异，并解析其在顺纹拉伸过程中的破坏路径，揭示杨木多维结构与破坏行为间的内在联系。**【结果】**(1)生长轮尺度：在顺纹拉伸作用下，结构差异较大的生长轮边界处产生剪切应力，导致生长轮界面或轮界处靠近早材的一侧形成断裂面。(2)细胞尺度：在轴向载荷作用下，杨木轴向细胞主要发生垂直于纹理的细胞横断，形成水平断面或弧形断面；沿径向排列的射线细胞之间发生剥离，裂纹延展至射线末端后会再次转为沿轴向开裂，形成阶梯状断面。破坏断面的差异体现了木材中不同细胞排列方向对裂纹扩展路径的引导作用。(3)细胞壁尺度：杨木细胞壁厚度变化较大的区域易发生跨壁断裂，形成横断破坏；裂纹在细胞壁内扩展时，S_1/S_2 界面或 S_2/S_3 界面层因微观结构差异成为剥离的薄弱环节，反映了细胞壁内部不同层之间结合力的差异，以及在应力作用下的响应特点；裂纹在细胞间沿顺纹方向扩展时，木纤维细胞之间沿 CML/S_1 界面层发生剥离,形成沿胞间层 CML 剥离的破坏模式，表明胞间层在顺纹拉伸载荷下结合力相对较弱。**【结论】**顺纹拉伸载荷作用下，杨木内部构造、细胞形态结构和细胞排列方向的差异显著影响杨木不同尺度的破坏模式。不同尺度上同一单元之间的结构和力学性质差异是影响杨木受外部载荷作用时内部应力分配的主要因素。未来可通过原位设备实时监测木材在力学载荷下生物大分子结构的微小变化，从分子层面揭示木材的力学响应机制。

关键词：杨木；多尺度结构；结构差异；顺纹拉伸；破坏模式；细胞壁；胞间层 (CML)
中图分类号：S781.29 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)09−0143−10
引文格式：李芸琪，初石民，林兰英，等. 顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征［J］. 北京林业大学学报，2025，47(9)：143−152. Li Yunqi, Chu Shimin, Lin Lanying, et al. Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 143−152.

Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading

Li Yunqi Chu Shimin Lin Lanying Fu Feng
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: ［**Objective**］ Wood, as an engineering material with a natural multiscale structure, often fails under external loading. Although the multiscale structure plays a key role in wood failure, the failure features at different structural levels and their influence mechanisms are still not fully understood. This paper aims to clarify the multiscale failure characteristics of poplar wood under longitudinal tensile load, especially

收稿日期: 2025−04−22 **修回日期:** 2025−08−19
基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD2200502)。
第一作者: 李芸琪。主要研究方向：木材多维结构解译。 Email: liyunqi-chn@outlook.com 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。
责任作者: 林兰英，研究员，博士生导师。主要研究方向：木竹材料界面评价与表征、木竹材功能化预处理。 Email: linly@caf.ac.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

focusing on the influence of cell structure and arrangement direction. The goal is to provide a theoretical basis for evaluating the mechanical properties of poplar wood and improving its engineering application. [**Method**] Poplar from *Populus* × *canadensis* plantation was selected as the research material. Tensile specimens were prepared from different regions within the growth ring. Structural features and mechanical differences at three scales: growth ring, cell, and cell wall were studied using SEM and AFM techniques. The fracture paths under longitudinal tension were analyzed to reveal the internal relationship between poplar wood structure and failure behavior. [**Result**] (1) Growth ring scale: under longitudinal tension, shear stress occurred near the growth ring boundary due to large structural differences. This leads to fracture along the ring boundary or on the earlywood side near the boundary. (2) Cell scale: under axial loading, axial cells mainly showed transverse fracture perpendicular to the grain, forming flat or curved fracture surfaces. Separation occurred between ray cells arranged in the radial direction. After the crack spreading to the end of ray cells, it turned again along the axial direction, forming a step-like fracture surface. The differences in fracture types reflected the guiding effect of different cell arrangements on crack propagation. (3) Cell wall scale: regions with large variation in cell wall thickness were more likely to experience through-wall fracture, forming transverse cracks. When cracks spreading within the cell wall, the interfaces between S_1/S_2 or between S_2/S_3 layers were weak points due to differences in their microscopic structure. This showed the variation in bonding strength between layers and their response under stress. When cracks spreading along the grain between cells, delamination occurred at the interface between the compound middle lamella (CML)/S_1, showing that the CML has relatively weak bonding strength under longitudinal tensile loading. [**Conclusion**] Under longitudinal tensile loading, the internal structure, cell morphology, and arrangement direction of poplar significantly affect the failure modes at different scales. Differences in structure and mechanical properties between similar units at the same scale are the main factors influencing internal stress distribution under external loads. In future studies, in-situ testing equipment can be used to monitor subtle changes in wood's macromolecular structure under mechanical load in real time. This will help reveal the mechanical response mechanisms of wood at the molecular level.

Key words: poplar wood; multiscale structures; structural differences; longitudinal tension; failure pattern; cell wall; compound middle lamella (CML)

木材是一种天然高分子复合材料，凭借高强韧性在工程结构中占据不可替代的地位[1]。在建筑、家具及桥梁等木质构件中，其稳定性与安全性直接决定工程寿命[2]，因而精准掌握木材在不同应力状态下的破坏行为，已成为优化设计、保障安全与健康监测的迫切需求[3]。

然而，木材破坏行为的复杂性源于其多尺度结构的耦合作用[4]，从宏观的生长轮到微观的细胞和细胞壁[5]，以及进一步细化的纳米级高分子结构[6]，不同尺度层次的相互影响共同塑造了木材的力学特性[7]。顺纹拉伸是一种对木材施加沿纤维方向单轴应力的测试方法，作为最简单的单向应力状态，为揭示木材在不同尺度结构下的破坏特征提供了直观的研究途径[8]。在生长轮层面，早材的细胞腔较大且细胞壁较薄，而晚材则具有较小细胞腔和较厚的细胞壁[9]，这种结构特征差异使得晚材在抗拉强度上明显优于早材[10]。Konukcu 等[11]研究表明，晚材的断裂韧性显著高于早材及早晚材过渡区域，而过渡区域的断裂韧性又略高于早材。由于生长轮内不同区域的密度和结构具有不均匀性，裂纹更易沿着生长轮的边缘纵向扩展[12]。在细胞层面，轴向管胞和木纤维作为厚壁组织，主要承担纵向荷载；木射线则以横向排列，与轴向管胞或木纤维成垂直关系[13]。这种不同细胞排列方向的差异造成了木材在径向和弦向的弹性模量不同，使得交叉场区域在拉伸过程中更易发生破坏[14]。在细胞壁层面，胞间层作为细胞间的连接结构，含有较高比例的木质素，其微观力学性能通常不及其他细胞壁层，表现出较弱的界面特性[15]。S_2 层由于厚度较大且微纤丝角度较小，对纵向力学性能起主要作用[16]，而 S_1 和 S_3 层的影响相对较小[17]。李振瑞等[18]通过纤维拔出实验证实，早材与早–晚材界面因结构和性能差异，在拔出后呈现截然不同的断裂形貌，进一步凸显了界面特性对破坏路径的决定性作用。综上，虽然宏观尺度的构造影响已得到广泛研究，但细胞及细胞壁尺度的结构破坏特征及其对力学性能的调控机制仍缺乏系统阐释；当前对

木材破坏机理缺乏关键认知，尚难以满足现代工程对高性能木质材料的需求。

为此，本研究以人工林杨木为对象，开展顺纹拉伸实验，聚焦生长轮、细胞、细胞壁 3 个尺度，系统解析结构差异与破坏演化的内在关联，旨在为阐明木材多尺度破坏机理提供理论依据与实验支撑。

1　材料与方法

1.1　材　料

人工林意大利杨（*Populus* × *canadensis*），采自河南临颍县，树龄 11 年，平均年轮宽度为 1.14 cm，胸径 25 cm。在胸径处截取 15 cm 厚圆盘，气干至平衡含水率后，取包含一个完整年轮的无疵木块试样备用。

1.2　研究方法

1.2.1　微观构造观测

选取杨木的第 7 生长轮，用滑走切片机（SM2010R，Leica，German）切取厚度为 10 μm，包含一个完整生长轮的横切片。以导管分子细胞腔尺寸差异为衡量标准，将同一生长轮划分为早材、中间（早晚材过渡区域）和晚材区域 3 个部分。通过数字显微镜（VHX-6000，KEYENCE，Japan）拍照，并采用 Image J 图像分析软件测算生长轮内不同区域、不同类型细胞的弦向和径向细胞壁壁厚、细胞腔直径，计算壁腔比，以量化不同区域的微观结构特征。

1.2.2　木薄片顺纹拉伸破坏实验

分别制备以轮界为中心的径切片以及早材、中间和晚材区域的弦切片，由于杨木晚材带较窄，取弦切片样时以轮界线为起始位置，向内截取 2 mm 厚度的样品，之后逐一检查横截面，避免包含轮界线影响实验结果。试样要求纹理通直，尺寸为 76 mm（纵向 L）× 15 mm（径向 R）× 2 mm（弦向 T）和 76 mm（L）× 15 mm（T）× 2 mm（R）。参照原位拉伸设备的试件要求[19]，通过哑铃状模具和微型砂光机将木片加工成哑铃状试样（图 1）。将试样调节至平衡含水率后，采用 MWD-w10 微机控制万能力学试验机以 0.15 mm/min 的加载速度进行顺纹拉伸测试。测试结束后，回收被拉断的木片用于后续表征分析，以研究不同区域的力学性能及其破坏模式。

1.2.3　微纤丝角的测定

分别在早材、中间和晚材区域位置切取尺寸为 30 mm（L）× 10 mm（T）× 1 mm（R）的弦切片，每种试样做 3 组重复。设定 X 射线衍射仪（D8 Advance，Bruker，German）参数：2θ 为 22.4°，电压为 40 kV，电流为 40 mA，扫描步长为 0.5°，试样旋转角度范围为 0° ~ 360°。采用 0.6T 法计算各试样的微纤丝角，结果取其平均值。

1.2.4　相对结晶度的测定

将早材、中间和晚材区域位置的试样磨粉过 200 目筛网。设定 X 射线衍射仪参数：电压为 40 kV，电流为 40 mA，扫描范围为 2θ = 5° ~ 40°，扫描步长为 0.05°，扫描速率为 0.1 (°)/s。根据 Segal 法计算样品的相对结晶度。

1.2.5　断裂形貌及破坏模式分析

采用场发射扫描电镜（FSEM，Hitachi S-4800，Japan）对弦切片和径切片拉伸破坏后的断面形貌进行表征，以分析杨木细胞结构在不同尺度下的破坏特征。并采用显微 CT 扫描系统（Micro-CT scanning system，Skyscan-1172，Belgium）对拉伸破坏后的无疵小试样断口形貌进行三维表征，通过采集试样各旋转角度下的投影数据，重建破坏断面 CT 图像。此外，为避免观察过程中对拉伸破坏后的试样造成人为损伤，采用树脂包埋[14]的方式保护试样的断面形貌，并在超薄切片机（Leica EM UC7，Wetzlar，Germany）对树脂包埋试样的横截面进行抛光处理后，采用原子力显微镜（AFM，Veeco，USA）扫描样品表面，从顶部开始每隔 200 μm 扫描一次，分析断面细胞壁上的裂纹扩展规律及破坏形貌。

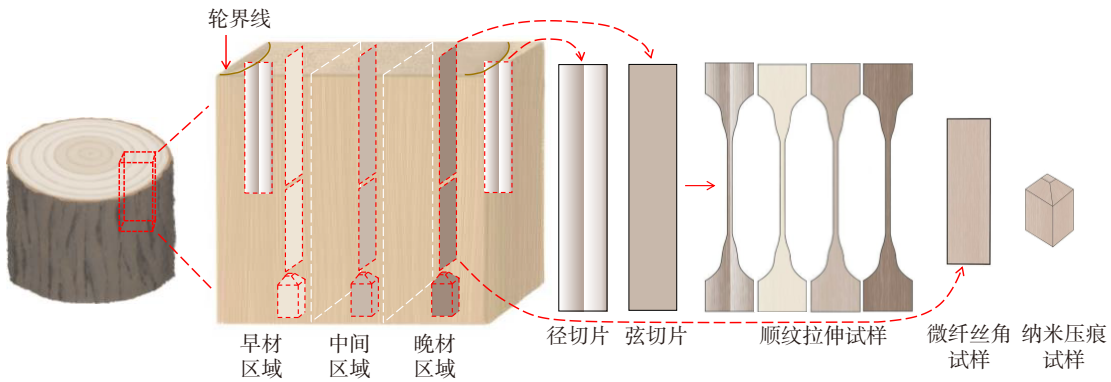


图 1　杨木样品制备示意图

Fig. 1　Schematic diagram of poplar sample preparation

1.2.6 细胞壁力学性能测试

杨木的轴向细胞主要有木纤维细胞和导管细胞，是顺纹拉伸载荷作用下主要承担应力的细胞。细胞壁是细胞在应力作用下的实际承载物质，木材的破坏本质上是大量细胞壁破坏的累积效果。因此，在细胞壁尺度下观察和分析木材的破坏行为具有重要意义。

纳米压痕测试能够精准测量杨木木纤维与导管细胞壁的压痕模量和硬度。准静态纳米压痕测试的取样位置与微纤丝角测试位置相同。将样品制成顶端为金字塔形的小木块，放入纳米压痕舱中平衡 3 d。测试前用超薄切片机对金字塔尖位置抛光，形成约 1 mm × 1 mm 的正方形测试区域。采用纳米压痕仪（TI 950，Hysitron，USA）搭配三棱锥型金刚石 Berkovich 压针（Ti-0039，Hysitron，USA）进行测试，针尖直径为 100 nm，三棱锥角度为 142.3°。通过准静态纳米压痕法，以最大载荷 125 μN 测试细胞壁力学性能。

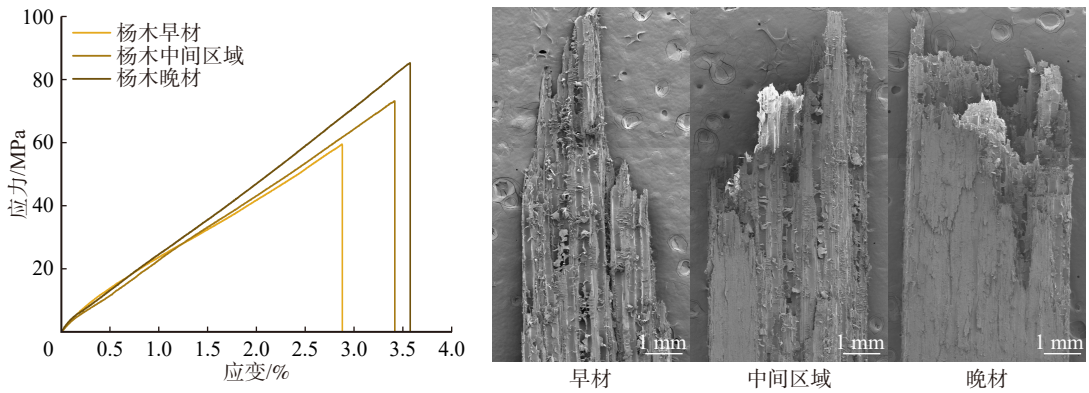
2 结果与分析

2.1 杨木不同区域的顺纹拉伸破坏

杨木早材、中间和晚材区域的断裂模式均为脆性断裂，且不受选材位置的影响（图 2）。相比之下，杨木宏观试件在顺纹拉伸作用下通常表现出线弹性破坏特征[20]，这种现象主要归因于宏观试件尺寸较大，受力面积更广，杨木作为黏弹性材料在发生脆性断裂前能够得到充分变形；受尺寸效应影响，当试样尺寸远小于力学测试标准时，其力学行为由局部主导机制决定。宏观力学实验中，较大的受力面积允许试样在断裂前完成充分的能量耗散与变形，而微观尺度的试件受限于尺寸约束，更易发生突发性脆断。杨木早材、中间和晚材区域的平均弹性模量分别为 1 937、2 008 和 2 381 MPa，呈现出由早材向晚材递增的趋势。通过 SEM 图（图 2b）观察发现，早材断面呈阶梯状，有明显的沿纹理扩展的纵向破坏，这是因为杨木早材区域为低密度疏松多孔结构，裂纹易沿薄弱界面扩展；中间区域断面呈斜三角形，裂纹沿纹理纵向扩展的趋势明显，这是由于密度梯度引发了混合型破坏；晚材区域试样的断面较为平整，呈现垂直纹理的横断特征，这是因为晚材区域密度较高，促使裂纹沿纹理方向垂直扩展[21]。杨木早材区域至晚材区域的弹性模量递增趋势与断裂形貌演变（阶梯状—斜三角—平整横断）共同证实了杨木生长轮尺度下的梯度结构与破坏行为具有一定的内在联系。

2.2 杨木生长轮和细胞构造差异对破坏特征的影响

细胞是木材的基本形态单位，木材生长环境的气候变化会导致生长轮内不同区域细胞的细胞结构产生显著差异。细胞壁作为木材的实体物质，是承担应力的主要载体。细胞壁的厚度决定了木材力学性能的基础强度，其在木材中所占的比例与力学性能呈正相关关系[22]。由表 1 可知，从早材到晚材区域，杨木导管的径向细胞腔直径差异极显著（$p < 0.001$），约降低了 71%，弦向细胞腔直径变化非常显著（$p < 0.01$），约降低了 57%，表明杨木早材区域的导管细胞腔直径远大于晚材区域，径向变化幅度略大于弦向。而导管细胞壁在弦向和径向上差异不明显，且壁厚变化幅度较小，均降低了约 16%。导管径向壁腔比为 0.03、0.05 和 0.11，弦向壁腔比为 0.05、0.06 和 0.09，壁腔比变化较小，说明在杨木生长轮内的不同区域中，导管细胞的构造差异主要体现在细胞腔尺寸的变化上。木纤维细胞腔直径差异均为极显著，径向腔径约减小了 72%，弦向腔径约减小了 32%，说明早材区域的木纤维细胞腔直径远大于晚材区域，且径向变化幅度远大于弦向。木纤维细胞的径向壁壁厚约增加了 56%，弦向壁壁厚约增加了



a 应力−应变曲线示意图　　b 断裂形貌 SEM 图

图 2 不同测试区域的顺纹拉伸破坏

Fig. 2 Longitudinal tensile failure in different test zones

表 1　杨木细胞壁壁厚和细胞腔腔径尺寸统计

Tab. 1　Statistics of poplar cell wall thickness and lumen diameter dimensions

细胞构造	细胞类型	方向	细胞壁壁厚或细胞腔直径平均值/μm			p值	显著性
			早材区域	中间区域	晚材区域		
细胞壁	木纤维	径向	3.20 ± 0.49	4.54 ± 0.46	4.98 ± 0.56	0.026	*
		弦向	3.29 ± 0.46	4.53 ± 0.49	6.98 ± 0.73	0.000	***
	导管	径向	1.75 ± 0.21	1.61 ± 0.15	1.51 ± 0.23	0.012	*
		弦向	1.77 ± 0.23	1.62 ± 0.15	1.53 ± 0.23	0.003	**
细胞腔	木纤维	径向	12.92 ± 2.17	10.76 ± 1.78	3.59 ± 0.92	0.000	***
		弦向	17.04 ± 2.36	10.80 ± 1.74	11.53 ± 2.43	0.000	***
	导管	径向	100.80 ± 6.60	68.49 ± 5.23	28.74 ± 2.92	0.000	***
		弦向	75.15 ± 7.07	55.18 ± 5.92	32.04 ± 3.76	0.001	**

注：*表示差异显著（$p < 0.05$），**表示差异非常显著（$p < 0.01$），***表示差异极显著（$p < 0.001$）。

112%，弦向壁细胞壁厚度差异极显著，晚材区域的木纤维细胞壁厚度远大于早材，且弦向变化幅度远大于径向。木纤维细胞径向的壁腔比为 0.50、0.84 和 2.77，弦向壁腔比为 0.39、0.84 和 1.21，增幅明显，说明杨木木纤维细胞在生长轮内不同区域具有明显构造差异，且主要是由于细胞壁厚度和细胞腔尺寸的协同变化导致的。整体来看，杨木导管细胞的尺寸远大于木纤维细胞，且木纤维细胞的细胞壁厚度从早材向晚材递增，细胞腔直径从早材向晚材递减，导管壁厚度和导管腔直径均为从早材向晚材递减。这可能是因为在生长发育过程中，杨木在生长初期的早材阶段优先发育导管以满足水分输运需求，而晚材阶段则转向厚壁木纤维的集中发育以增强力学支撑[23]。这种生物调控机制使杨木生长轮结构呈现渐变梯度结构。

杨木细胞壁厚度和壁腔比等参数是密度在组织层面的直观表现，可以直接反映杨木力学性能的优劣，承担力学强度的实质结构越多，其力学性能越好。结合顺纹拉伸实验结果可知，杨木轮内不同区域的细胞壁厚度和壁腔比与弹性模量呈正相关，均由早材向晚材区域逐渐增大，这一现象与冯启明等[24]的研究结果一致。杨木生长轮内力学性能的梯度变化本质上是其细胞构造差异的宏观体现，细胞壁厚度的显著增加与细胞腔径的显著减小共同构建了从早材到晚材的力学强化机制。木材生长轮内的梯度变化结构本质上是天然梯度材料的体现，这一特性也使木材在力学性能方面具有独特的天然优势。

木材细胞壁上微纤丝纤维素的取向是影响细胞力学性能的主要因素之一。杨木的微纤丝角由早材向晚材区域呈递减的趋势（表 2），微纤丝角减少了 6.92%，差异不显著。结晶度反映了纤维素聚集时形成结晶的程度，对木材的力学性能有一定影响。杨

表 2　杨木轮内不同区域的微纤丝角与结晶度

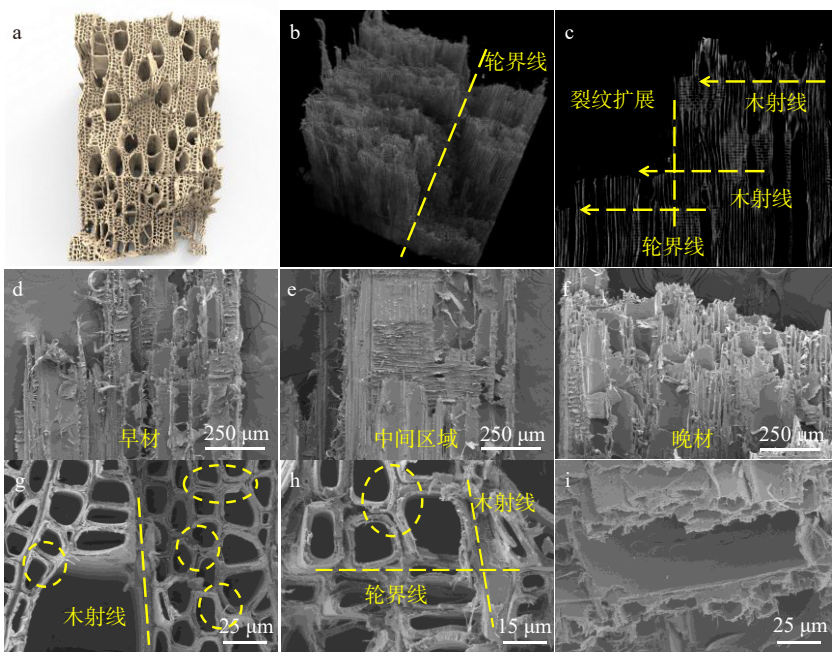
Tab. 2　Microfibril angle and crystallinity in different regions of growth ring of poplar

分区	微纤丝角/(°)	结晶度/%
早材区域	11.85 ± 0.95	0.37 ± 0.02
中间区域	11.30 ± 0.57	0.45 ± 0.03
晚材区域	11.03 ± 0.98	0.48 ± 0.02

木同一生长轮内不同区域的结晶度差异不明显，但结晶度由早材向晚材递增，与弹性模量成正比。这一结果与图 2b 中的断裂模式相对应。晚材区域的微纤丝角更小，结晶度更高，即微纤丝与纤维方向的夹角更小，结晶区中纤维素大分子链排列更为有序、紧密，相互作用力更强，抵抗外力的能力更强，因此在顺纹拉伸时更易产生垂直纹理的横断破坏。而早材则更容易出现沿纹理方向撕裂的纵向破坏。杨木从早材到晚材区域力学性能的增强源于纤维素微纤丝结构的差异，微纤丝角减小与结晶度增大共同增强了细胞的力学性能。

通过 CT 观察杨木径切片拉伸破坏后轮界区的断裂形貌（图 3a ~ c），发现在图 3b 与图 3c 中的轮界处存在明显的阶梯状断面。这是因为在顺纹拉伸作用下，杨木不同细胞的排列方向、细胞类型等结构和性质差异导致不同细胞的受载方向或对载荷的响应不同，进而形成不同类型的破坏。由于生长轮内不同区域的细胞结构和密度存在梯度差异，顺纹拉伸时生长轮边界处因结构差异较大，会产生剪切应力，导致裂纹沿轮界处或轮界处靠近早材的一侧纵向扩展[14]。

对杨木不同区域的弦切片拉伸破坏试样表征断裂形貌（图 3d~f），可以看出早材区域的细胞破坏较为严重，存在明显的细胞破坏碎片。在细胞壁尺度，破坏模式既有细胞壁横向断裂，即垂直于纹理方向



a 为杨木断裂形貌建模图，b、c 为杨木断裂形貌 CT 图，d～i 为杨木断裂形貌 SEM 图。

图 3 杨木试样的断裂失效及细胞破坏模式

Fig. 3 Fracture and cell wall failure modes of poplar specimens

的横断；也有胞壁内劈裂，即平行于纹理方向纵向开裂露出细胞腔的横断。部分木纤维沿微纤丝方向撕裂，形成斜断面，并有纤丝被拔出（图 3d）。中间区域的破坏模式较为复杂，存在细胞与细胞之间的剥离，部分细胞出现斜断，木射线与木纤维交界处存在阶梯状断裂（图 3e）。晚材区域的断裂表面较为平整，细胞也较为完整，导管和木纤维主要发生垂直纹理的横断（图 3f）。这是由于在相同拉伸速率下，不同区域均匀分布应力、调整内部结构的能力不同[25]。

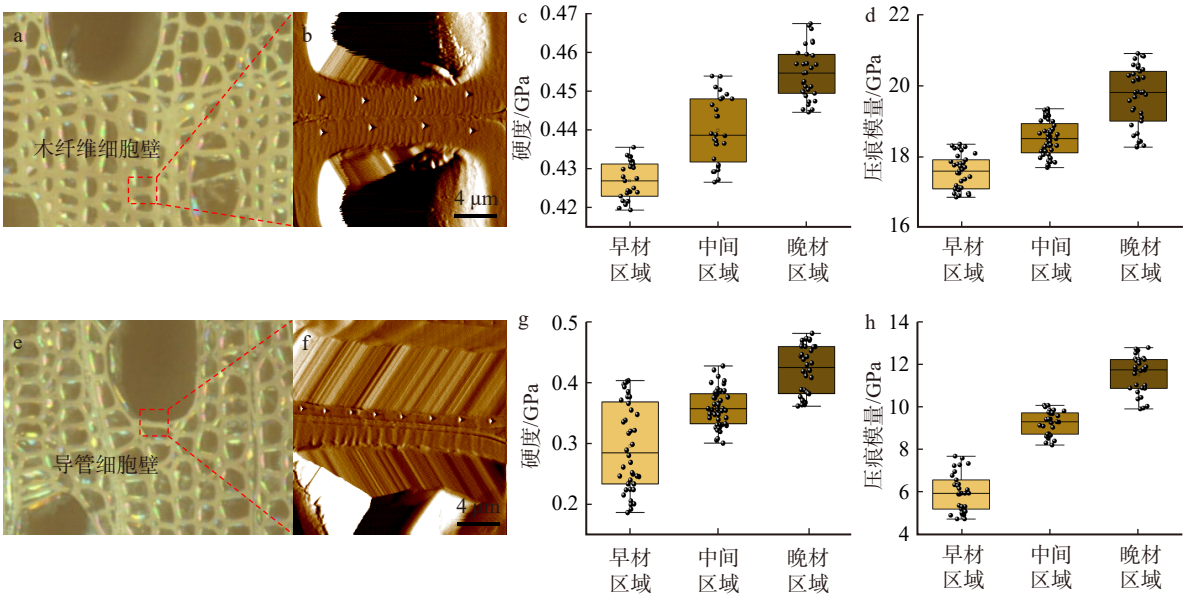
由于木射线细胞是沿径向排列分布的，杨木在顺纹拉伸作用下，产生的轴向拉伸应力受木射线影响，沿径向分散，与射线细胞的排列方向一致。在轴向拉伸载荷下，射线细胞之间发生剥离，部分射线细胞以及射线和纤维细胞交界的位置形成断面（图 3b、c、g）。这可能是因为射线细胞属于薄壁细胞，强度较低[26]，且射线细胞之间的胞间层强度小于射线细胞壁的强度。同时，射线细胞周围的木纤维细胞易发生垂直于纹理的横断，这是由于射线与木纤维细胞相交的交叉区域存在大量纹孔，易产生应力集中[27]。沿轴向排列的木纤维细胞横断后产生的裂纹沿射线方向扩展，到射线细胞末端后发生偏转，细胞间的破坏由沿射线方向的横断转变为沿轴向细胞的横断，形成阶梯状断面（图 3b、f）。

对比横断面形貌图可见，部分木纤维细胞间整体脱黏，胞间层存在裂纹，导致部分木纤维被整体剥离（图 3g～i）。由于导管的纤维素、半纤维素含量较低，木质素含量较高，且导管微纤丝排列较松散，整体强度较低。在顺纹拉伸作用下，导管易随木纤维细胞发生细胞横断，形成横断面或弧形断面（图 3d、g、i）。生长轮内细胞结构与破坏路径的差异反映了杨木内部不同结构在不同区域对顺纹拉伸载荷的响应机制，揭示了杨木细胞结构与破坏行为间存在一定的内在联系。

2.3 杨木细胞壁壁层差异对破坏特征的影响

不同区域木纤维的平均硬度和平均压痕模量均高于导管壁，且从早材到晚材区域，杨木纤维壁和导管壁的硬度和压痕模量均呈递增趋势（图 4）。结合微纤丝角与结晶度测试结果分析可知，微纤丝角的大小与细胞壁的弹性模量和硬度呈负相关，而结晶度的大小与细胞壁的弹性模量和硬度呈正相关。这是因为细胞壁主要由微纤丝组成，当杨木细胞壁承受轴向压力时，受压位置的微纤丝与细胞轴向的夹角越小，其硬度和弹性模量就越高。结晶区的纤维素分子链呈定向有序、排列紧密，因而密度较大。结晶度越高，说明结晶区占纤维整体的百分率越高，纤维素分子链排列更整齐，密度越高，进而使该区域抵抗外力的能力更强，受外力作用时更不容易发生变形。

根据纳米压痕测试结果，导管细胞的细胞壁力学性能远低于木纤维细胞的力学性能。这一结果再次验证了木纤维细胞是杨木受到外界载荷时主要承担力学性能的细胞，导管更多的是起水分传输作用。因此在观察杨木细胞壁尺度的破坏特征时，以木纤维细胞的壁层破坏作为主要观察对象。不同位置杨木破坏横断面的 AFM 图像（图 5a～i）表明，在细胞

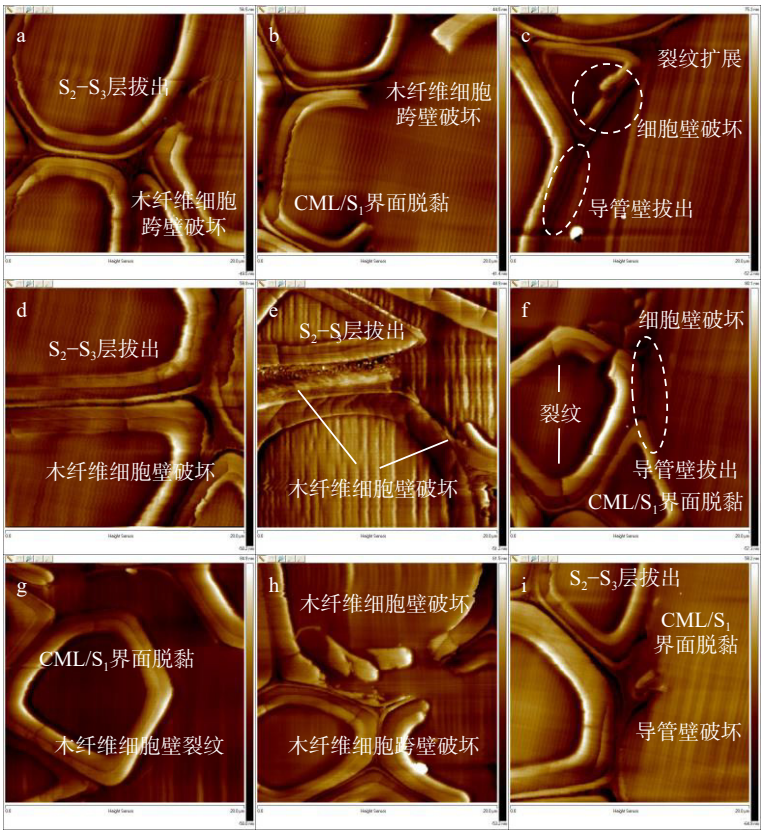


a、b 为木纤维细胞壁原位扫描图，c 为杨木木纤维壁硬度，d 为杨木木纤维壁压痕模量，e、f 为导管分子细胞壁原位扫描图，g 为杨木导管壁硬度，h 为杨木导管壁压痕模量。

图 4　杨木的不同细胞壁纳米压痕测试示意图

Fig. 4　Diagram of different cell wall nanoindentation test of poplar

壁尺度下不同选材位置的破坏模式基本一致。在细胞壁的几何过渡区域（从角隅处到弦向或径向细胞壁过渡的区域），或者细胞壁中间位置厚度最小的区域，由于结构突变易产生应力集中，成为优先萌生裂纹的位置，进而形成开裂或细胞壁横断（图 5a、b、f、g、h）。部分细胞壁破坏严重，形成多个形状不规则的碎块。这一现象反映了细胞壁内部不同壁层之间因结合力存在差异，在应力作用下的响应特点不同。



a、b、c 为早材细胞壁破坏 AFM 图，d、e 为中间区域细胞壁破坏 AFM 图，g ~ i 为晚材细胞壁破坏 AFM 图。CML 为胞间层。

图 5　杨木试样的细胞壁破坏模式

Fig. 5　Cell wall failure modes of poplar specimens

当细胞壁发生横断破坏时，细胞间结构的差异可能导致胞间层发生剥离破坏，裂纹可能沿胞间层(CML)/S_1 界面扩展(图 5c、f、i)，导致木纤维细胞脱黏，形成细胞间破坏，细胞沿胞间层剥离，细胞壁整体拔出(图 5c、f、g、i)。在裂纹扩展过程中，细胞壁不同壁层间微纤丝角的差异可能导致 S_2 层更易被整体拔出，这种壁层超微结构上的差异可能是造成细胞壁壁层间剥离破坏的内在原因[18]。裂纹沿 S_1–S_2 界面或 S_2–S_3 界面扩展，使 S_1 与 S_2 层或 S_2 与 S_3 层脱黏(图 5a ~ f、i)，最终导致细胞壁沿壁层剥离，形成壁层间破坏或胞间层的剥离破坏[25]，这说明细胞间层在顺纹拉伸载荷下结合力相对较弱，表现出相对较弱的界面特性，在外界应力作用下更易发生破坏。

2.4 杨木多维尺度结构差异对其破坏特征的影响

杨木具有复杂的多维尺度结构，在其力学行为中起着关键的作用。在顺纹拉伸作用下，杨木的破坏模式表现出明显的多尺度特性，其结构特征与破坏行为存在着明确的构效关系。如图 6 所示，杨木的破坏断裂模式主要分为生长轮尺度、细胞尺度和细胞壁尺度这 3 个尺度。

在生长轮尺度，杨木的结构差异主要体现在轮界处。由于早材腔大壁薄，晚材腔小壁厚，杨木在轮界处的构造具有显著差异。此外，微纤丝的排列角度与结晶度的大小对杨木破坏也有一定影响。微纤丝角小、结晶度高的晚材区域断口平滑，而微纤丝角大、结晶度低的早材区域存在严重的撕裂变形。生长轮内的梯度渐变结构使木材在生长轮界面处具有显著差异，因而在顺纹拉伸作用下，拉伸应力易导致结构差异较大的生长轮边界发生剪切破坏，裂纹在生长轮边界沿纹理方向纵向扩展延伸，最终在轮界或轮界靠近早材的一侧形成断面。

在细胞尺度，由于不同细胞的结构及排列方式存在差异，导致不同细胞对载荷的响应不同。射线细胞是导致杨木径向和弦向力学性能差异的主要原因。这主要是因为射线细胞沿径向水平排列，垂直分布在轴向细胞之间，干扰了轴向细胞的正常排列。此外，射线细胞的分布方向与轴向细胞呈垂直交叉状，所以射线细胞的受载方向存在差异。在顺纹拉伸作用下，杨木轴向细胞受顺纹拉伸应力，发生细胞横断；射线细胞受垂直于细胞排列方向的拉伸应力，出现细胞间剥离或在射线细胞末端发生沿轴向的细胞横断。从结构材料的角度看，导管往往被视为缺陷[28]。

在细胞壁尺度，由于木纤维细胞壁通常包含 S_1、S_2、S_3 这 3 个壁层，在细胞进行轴向拉伸时，细胞壁的不同壁层与胞间层之间会受剪切应力影响，沿微纤丝排列方向发生螺旋开裂或断裂。根据破坏位置可以将细胞壁壁层破坏分为细胞壁横断破坏、细胞壁壁层间剥离和胞间层剥离 3 种破坏模式。其中细胞壁横断破坏又分为平行于纹理方向的横断和垂直于纹理方向的横断，即沿细胞方向纵向断裂露出细胞腔的破坏形貌和露出细胞横截面的破坏形貌。

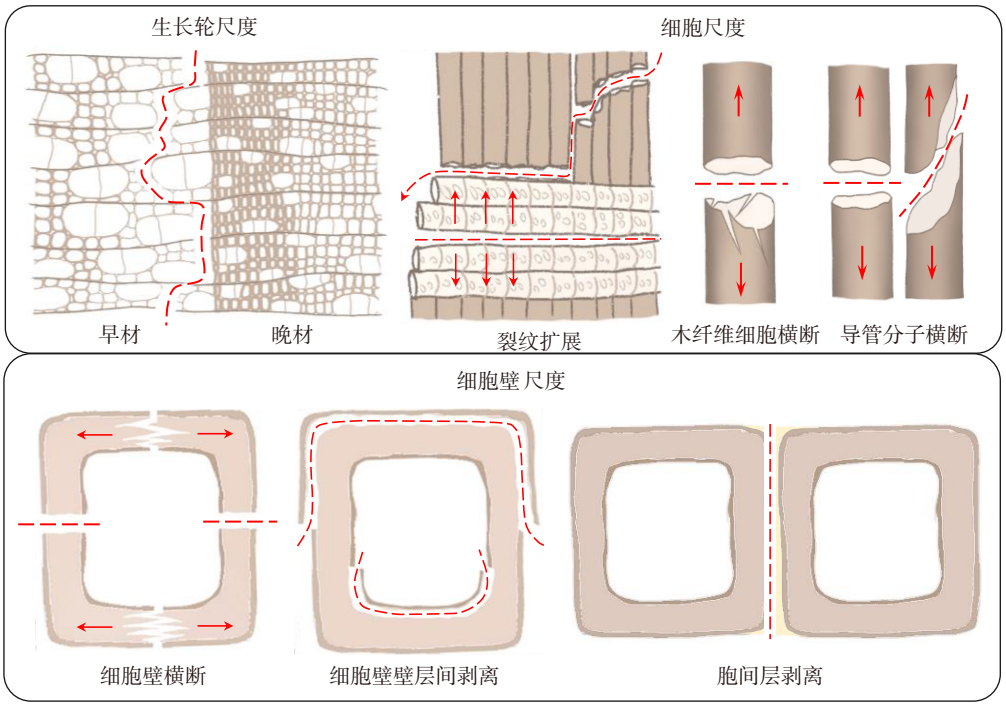


图 6 杨木多尺度断裂破坏模式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multi-scale failure mode of poplar

3 结　　论

杨木作为一种天然工程材料，其复杂的多尺度结构常使其在外部载荷作用下导致高度复杂的失效破坏行为。尽管现有研究对宏观尺度的破坏特征已有一定认识，但对细胞尺度和细胞壁尺度的破坏特征以及不同尺度结构对失效破坏的影响机制尚有待进一步研究。本研究聚焦于人工林杨木多尺度结构在顺纹拉伸载荷作用下的不同破坏模式，通过多种技术手段（如纳米压痕测试、CT、AFM 等）分析了杨木多尺度结构（生长轮、细胞和细胞壁尺度）的构造特征与破坏行为，探讨了杨木在不同尺度上的结构差异对破坏的响应机制。研究表明，杨木的破坏特性与其多层次结构之间的相互作用密切相关。

（1）在顺纹拉伸作用下，结构差异较大的生长轮边界处产生剪切应力，裂纹沿轴向扩展，在生长轮界面或靠近早材的一侧形成新的断裂面。这种不同生长轮区域细胞特性与破坏路径的差异，反映了杨木内部结构在不同区域对顺纹拉伸载荷的响应机制。

（2）在细胞尺度上，木材顺纹拉伸的破坏模式主要受细胞排列方向和细胞结构的影响。在轴向载荷作用下，轴向细胞主要发生垂直于纹理的横断，沿径向排列的射线细胞之间发生剥离，这体现了木材中不同细胞排列方向对裂纹扩展路径的引导作用。

（3）当裂纹在细胞壁内扩展时，S_1–S_2 界面或 S_2–S_3 界面层因微观结构差异成为剥离的薄弱环节。这种界面层的剥离破坏了细胞壁的完整性，反映了细胞壁内部不同层之间结合力的差异，以及在应力作用下的响应特点。与此同时，当裂纹在细胞间沿顺纹方向扩展时，木纤维细胞之间沿 CML–S_1 界面层发生剥离，形成沿胞间层（compound middle lamella，CML）剥离的破坏模式。这种沿胞间层的剥离表明胞间层在顺纹拉伸载荷下结合力相对较弱，裂纹更容易沿着这一路径扩展。

本研究深入探讨了杨木多尺度结构与其在顺纹拉伸载荷下的失效破坏特征之间的关联，为木材力学行为及其对力学性能的调控机制提供了理论支持和实践指导。然而，现有研究仍局限于生长轮、细胞及细胞壁层次，尚未在分子尺度上揭示木材的力学响应机制。未来研究可进一步通过原位设备，如力学加载装置与傅里叶变换红外光谱仪或广角 X 射线衍射联用技术[29]，实时监测木材在力学载荷下生物大分子结构的微小变化，以全面揭示木材从宏观到分子尺度的力学响应机制，推动木材高性能应用的创新发展。

参　考　文　献

[1] 李坚, 甘文涛, 王立娟. 木材仿生智能材料研究进展 [J]. 木材科学与技术, 2021, 35(4): 1−14.
Li J, Gan W T, Wang L J. Research progress on wood biomimetic intelligent materials[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(4): 1−14.

[2] 吴义强. 木材科学与技术研究新进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 1−28.
Wu Y Q. Newly advances in wood science and technology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(1): 1−28.

[3] Caniato M, Marzi A, da Silva S M, et al. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103066.

[4] 初石民, 李芸琪, 林兰英, 等. 载荷作用下木材的变形和破坏行为机制及影响因素研究进展 [J]. 材料导报, 2025, 39(17): 1−15.
Chu S M, Li Y Q, Lin L Y, et al. The deformation and fracture behavior mechanisms of wood under load and its influencing factors[J]. Materials Reports, 2025, 39(17): 1−15.

[5] Trentin L N, Alcântara A C S, Batista C G T, et al. Unraveling the mechanical behavior of softwood secondary cell walls through atomistic simulations[J]. Biomacromolecules, 2025, 26(6): 3395−3409.

[6] 卢芸. 木材超分子科学: 科学意义及展望 [J]. 木材科学与技术, 2022, 36(2): 1−10.
Lu Y. Wood supramolecular science: scientific significance and prospects[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(2): 1−10.

[7] Golovin Y I, Gusev A A, Golovin D Y, et al. Multiscale mechanical performance of wood: from nano- to macro-scale across structure hierarchy and size effects[J]. Nanomaterials, 2022, 12(7): 1139.

[8] 李珠, 蒋佳荔, 吕建雄. 不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 138−145.
Li Z, Jiang J L, Lü J X. Tensile creep characteristics of compression wood and normal wood under different temperatures and loads[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 138−145.

[9] Friend A D, Eckes-Shephard A H, Tupker Q. Wood structure explained by complex spatial source-sink interactions[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7824.

[10] Büyüksarı Ü, As N, Dündar T. Mechanical properties of earlywood and latewood sections of Scots pine wood[J]. BioResources, 2017, 12(2): 4004−4012.

[11] Konukcu A C, Quin F, Zhang J. Effect of growth rings on fracture toughness of wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79(6): 1495−1506.

[12] Wang D, Lin L Y, Fu F, et al. Fracture mechanisms of softwood under longitudinal tensile load at the cell wall scale[J]. Holzforschung, 2020, 74(7): 715−724.

[13] Thomas P A. Trees: their natural history[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[14] Wang D, Lin L, Fu F, et al. The fracture mechanism of softwood via hierarchical modelling analysis[J]. Journal of Wood Science, 2019, 65(1): 58−62.

[15] Qin L Z, Lin L Y, Fu F, et al. Micromechanical properties of wood cell wall and interface compound middle lamella using quasi-static nanoindentation and dynamic modulus mapping[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(1): 549−558.

[16] 刘浩正, 王建山, 石广玉. 应压木细胞壁 S_2 层的微纤丝螺旋角对其抗压韧性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(4): 136−146.
Liu H Z, Wang J S, Shi G Y. Effects of microfibril helix angle in the S_2 layer of compression wood cell wall on the compressive toughness of it[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 136−146.

[17] Li J, Kasal B. Review on the structure–property relationship of lignocellulosic materials measured by atomic force microscopy[J]. Biomacromolecules, 2025, 26(3): 1404−1418.

[18] 李振瑞, 李芸琪, 林兰英, 等. 基于纤维拔出研究木材胶合界面的断裂行为 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 117−126.
Li Z R, Li Y Q, Lin L Y, et al. Fracture behavior of wood bonding interface based on fiber pull-out test[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 117−126.

[19] 沈观林, 胡更开, 刘斌. 复合材料力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Shen G L, Hu G K, Liu B. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

[20] 任海青, 江泽慧, 邵卓平. 人工林杉木、马尾松木材的断裂韧性 [J]. 木材工业, 2001(1): 13−14.
Ren H Q, Jiang Z H, Shao Z P. Fracture toughness of plantation timber of Chinese fir and masson pine[J]. China Wood Industry, 2001(1): 13−14.

[21] Li A, Jiang J, Lu J. Differences in the viscoelastic properties between earlywood and latewood in the growth rings of Chinese fir as analyzed by dynamic mechanical analysis (DMA) in the temperature range between −120 ℃ and 120 ℃[J]. Holzforschung, 2019, 73(3): 241−250.

[22] Li M, Ren H, Wang Y, et al. Comparative studies on the mechanical properties and microstructures of outerwood and corewood in *Pinus radiata* D. Don[J]. Journal of Wood Science, 2021, 67(1): 60.

[23] Noyer E, Stojanovi M, Horáek P, et al. Toward a better understanding of angiosperm xylogenesis: a new method for a cellular approach[J]. New Phytologist, 2023, 239(2): 1−5.

[24] 冯启明, 任素红, 吕建雄, 等. 三种针叶树材单根管胞形态与拉伸性能 [J]. 木材科学与技术, 2022, 36(1): 43−48.
Feng Q M, Ren S H, Lü J X, et al. Study on the morphology and tensile properties of single tracheids of three softwoods[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(1): 43−48.

[25] Lanvermann C, Hass P, Wittel F K, et al. Mechanical properties of Norway spruce: intra-ring variation and generic behavior of earlywood and latewood until failure[J/OL]. ArXiv Preprint, [2025−03−23]. http://arXiv:1509.04012, 2015.

[26] Li X, Zhou Y, Yan Y, et al. A single cell model for pretreatment of wood by microwave explosion[J]. Holzforschung, 2010, 64(5): 633−637.

[27] Muzamal M, Gamstedt E K, Rasmuson A. Mechanistic study of microstructural deformation and stress in steam-exploded softwood[J]. Wood Science and Technology, 2017, 51(3): 447−462.

[28] Hou J, Jiang Y, Yin Y, et al. Experimental study and comparative numerical modeling of creep behavior of white oak wood with various distributions of earlywood vessel belt[J]. Journal of Wood Science, 2021, 67(1): 57.

[29] 漆楚生, 詹志斌, 戴璐. 木材微观结构分析方法与特征参数 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 7−18.
Qi C S, Zhan Z B, Dai L. Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 7−18.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）