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

全场应变核磁共振同步耦合探究红锥木材多尺度干缩开裂机制

李昱昂 王鑫 柴宇博 唐继新 王小青 孙柏玲

Synchronous coupling of VIC-3D and LF-NMR to elucidate the multiscale shrinkage and cracking mechanism of *Castanopsis hystrix* wood

Li Yuang, Wang Xin, Chai Yubo, Tang Jixin, Wang Xiaoqing, Sun Bailing

引用本文:
李昱昂, 王鑫, 柴宇博, 唐继新, 王小青, 孙柏玲. 全场应变核磁共振同步耦合探究红锥木材多尺度干缩开裂机制[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):180–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250320
Li Yuang, Wang Xin, Chai Yubo, Tang Jixin, Wang Xiaoqing, Sun Bailing. Synchronous coupling of VIC–3D and LF–NMR to elucidate the multiscale shrinkage and cracking mechanism of *Castanopsis hystrix* wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):180–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250320

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250320

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征

Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading

北京林业大学学报, 2025, 47(9): 143–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250136

基于X–ray CT的载荷作用下木材内部形变研究

Exploring the internal deformation of wood under loading based on X–ray CT

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 160–164. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200290

基于糠醇改性的木材细胞壁孔隙变化对水分的影响

Effects of cell wall pore changes on water of wood modified by furfuryl alcohol

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 127–136. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230156

微波加热中木材内部温度场的电磁热耦合模拟

Electromagnetic–thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating

北京林业大学学报, 2025, 47(9): 162–170. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250101

等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制

Influence of micro–pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood

北京林业大学学报, 2026, 48(3): 203–210. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250300

间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响

Short–term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations

北京林业大学学报, 2026, 48(3): 26–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250329

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250320

全场应变−核磁共振同步耦合探究红锥木材多尺度干缩开裂机制

李昱昂[1,2] 王 鑫[1] 柴宇博[1] 唐继新[3] 王小青[1] 孙柏玲[1]
（1. 中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091；2. 南京林业大学，江苏 南京 210037；
3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心，广西 凭祥 532600）

摘要:【目的】珍贵用材树种红锥在加工利用过程中易发生开裂，严重影响其出材率和附加值，目前有关红锥易开裂的内在机制尚缺乏系统性研究。本研究旨在探究红锥人工林木材在水分变化状态下的多尺度结构干缩行为及其对开裂的影响机制，以期为红锥的防开裂改性及优化干燥工艺提供理论依据。**【方法】**为解析含水率变化引发木材开裂的动态过程，将非接触全场应变测量系统（VIC-3D）与低场核磁共振技术（LF-NMR）同步耦合，实现对木材心边材在干燥过程中全场应变分布与水分状态（自由水、结合水）的实时原位监测。结合激光共聚焦显微镜（CLSM）与小角 X 射线散射（SAXS），解析不同含水率阶段纤维细胞的形变特征及纤维素结构的演变，建立从宏观应变、介观水分到微观结构的多尺度关联。**【结果】**（1）红锥木材的干缩应变自髓心向边材呈阶梯状递减分布，心材应变大于边材，弦向应变大于径向。当含水率降至约 40% 时，心边材均开始产生径向微裂纹，且心材因干缩形变更大而最终形成更多非闭合裂纹。（2）结合水与自由水的横向弛豫时间均随含水率降低而减小。裂纹的扩展与结合水的排出过程密切相关，在水分进一步散失后，部分裂纹呈现闭合趋势。（3）从细胞到分子层面，心边材纤维细胞、细胞壁和细胞腔均发生干缩，且弦向干缩率大于径向，心材干缩程度总体大于边材；纤维素微纤丝间距缩小，且心材变化更为显著。**【结论】**人工林红锥木材的开裂是由水分变化诱发的多尺度干缩行为协同作用的结果。其中，结合水的排出是引发开裂的关键节点，当含水率降至 40% 左右时，协同作用下的应力集中诱发微裂纹的萌生与扩展。心材因在多尺度上表现出更大的干缩形变，导致其开裂程度更为严重。本研究基于多场信息同步耦合与多尺度关联分析，阐明了红锥木材水分迁移驱动多尺度干缩进而诱发开裂的动态过程，为其干燥工艺优化与防裂改性提供科学依据。

关键词：木材干缩开裂；红锥人工林；多尺度结构；水分迁移；全场应变测量 (VIC-3D)；低场核磁共振 (LF-NMR)；小角 X 射线散射 (SAXS)；珍贵树种利用

中图分类号：S781.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0180−11

引文格式：李昱昂，王鑫，柴宇博，等. 全场应变−核磁共振同步耦合探究红锥木材多尺度干缩开裂机制［J］. 北京林业大学学报，2026，48(5)：180−190. Li Yuang, Wang Xin, Chai Yubo, et al. Synchronous coupling of VIC-3D and LF-NMR to elucidate the multiscale shrinkage and cracking mechanism of *Castanopsis hystrix* wood［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 180−190.

Synchronous coupling of VIC-3D and LF-NMR to elucidate the multiscale shrinkage and cracking mechanism of *Castanopsis hystrix* wood

Li Yuang[1,2] Wang Xin[1] Chai Yubo[1] Tang Jixin[3] Wang Xiaoqing[1] Sun Bailing[1]
(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
3. Chinese Academy of Forestry Experimental Centre of Tropical Forest, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

收稿日期：2025−08−22 **修回日期：**2026−03−16

基金项目：中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（CAFYBB2023MB020）。

第一作者：李昱昂。主要研究方向：木材改性。Email：lyuang798@163.com 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号林科院木工所。

责任作者：孙柏玲，副研究员。主要研究方向：木材功能性改良。Email: sun_bai_ling@163.com 地址：同上。

本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: ［**Objective**］The valuable timber tree species *Castanopsis hystrix* is prone to cracking during processing and utilization, which severely affects its yield and added value. Currently, there is a lack of systematic research on the intrinsic mechanism of its susceptibility to cracking. This study aims to explore the multi-scale structural shrinkage behavior and mechanism of moisture variation on cracking in *C. hystrix* plantation wood, in order to provide a theoretical basis in terms of cracking prevention, wood drying, and modification. ［**Method**］To elucidate the dynamic process of wood cracking caused by moisture content changes, a non-contact full-field strain measurement system (VIC-3D) was coupled with low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) to enable real-time in-situ monitoring of full-field strain distribution and moisture states (free water and bound water) of the heartwood and sapwood during the drying process. Combined with confocal laser scanning microscopy (CLSM) and small-angle X-ray scattering (SAXS), the deformation characteristics of fiber cells and the evolution of cellulose structure at different moisture content stages were analyzed, establishing a multi-scale correlation from macroscopic strain and mesoscopic moisture to microscopic structure. ［**Result**］(1) The drying shrinkage strain of *C. hystrix* wood decreases in a stepwise manner from the pith to the sapwood, with the strain in the heartwood being greater than that in the sapwood, and the tangential strain being greater than the radial strain. As the MC decreased to about 40%, radial microcracks appeared in both heartwood and sapwood; however, due to the increased tangential strain, numerous large and non-closing cracks appeared in the heartwood. (2) The transverse relaxation times (T_2) of both bound and free water in heartwood and sapwood decreases as the moisture content reduces. The crack propagation was closely related to the process of bound water expulsion. After further moisture loss, some cracks show a tendency to close. (3) From the cellular to molecular level, the cell walls and lumens of fiber in heartwood and sapwood underwent shrinkage. The tangential shrinkage rate of the fiber cells was higher than that in radial, and shrinkage rate in heartwood was higher than that in sapwood. The cellulose microfibril spacing decreased, with more pronounced changes observed in heartwood. ［**Conclusion**］The cracking of *C. hystrix* plantation wood results from the coordinated action of multi-scale shrinkage behavior induced by moisture variation. Among them, the expulsion of bound water is the key node that triggers cracking. When the moisture content drops to around 40%, the stress concentration induced by the coordinated effect leads to the initiation and propagation of microcracks. The heartwood, due to its greater dry shrinkage deformation at multiple scales, shows a more severe cracking degree. By integrating synchronous multi-field information coupling with multi-scale correlation analysis, this study elucidates the dynamic process by which moisture migration drives multi-scale shrinkage and subsequently induces cracking in *C. hystrix* wood, providing a scientific basis for optimizing its drying process and anti-cracking modification.

Key words: wood shrinkage and cracking; *Castanopsis hystrixplantation* plantation; multiscale structure; moisture migration; full-field strain measurement (VIC-3D); low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); small-angle X-ray scattering (SAXS); valuable tree species utilization

珍贵木材作为我国重要的木材战略资源之一，具有密度大、硬度高、纹理优美等特点，是制造高档装饰、装修材料及家具、乐器等实木制品的重要用材[1]。然而，目前国内对优质大径材，特别是珍贵阔叶材的需求，仍需国际市场供给，因此，加快其林木培育与加工利用技术研发，是保障我国木材安全的有效措施[2]。红锥（*Castanopsis hystrix*）是我国南方珍贵用材树种之一，因其具有生长快、适应性好以及材质优良等特性，在家具、装饰和高端木制品领域具有较高的经济价值。近年来，红锥人工林在广西、广东等地已营造近 19 万 hm^2，使其成为当前粤桂地区营林面积最大的珍贵用材树种[3]。但是，由于人工林红锥木材生长应力大，在贮存、制材、干燥以及加工过程中极易发生开裂，严重降低了木材的出材率和等级，影响了其加工性能与产品附加值，极大限制了对该树种的高效利用[4]。现有研究主要关注其物理力学性能[5]、干燥工艺[6]以及材质改良[3]等方面，本研究团队前期研究了人工林红锥木材的开裂特征与分布，发现裂纹以径裂为主，主要分布在木射线与纤维细胞之间的胞间层处[7]，但其成因尚不明晰。因此，

深入探索人工林红锥木材的开裂机制，对解决其加工利用瓶颈问题具有重要意义。

木材作为一种各向异性的生物质材料，富含亲水性基团和孔隙结构，具有较强的吸湿性。受生长条件、含水率变化等影响，木材内部会产生生长应力和干燥应力进而导致开裂，木材干燥开裂的根本内应力则主要源于含水率梯度和干缩各向异性[8]。因此，探明木材与水分的相互作用是揭示其开裂机制的关键。众所周知，木材中的水分主要包括自由水和结合水，其中结合水含量的变化对木材尺寸稳定性有直接的影响[9]。已有诸多研究从不同角度对此开展探索。例如，Senni 等[10]运用光纤布拉格光栅传感器与便携式单边核磁共振技术，研究了银冷杉（*Abies alba*）木材含水率与纵向应变的动态关系，发现木材结合水形成的水分子团簇主导了木材形变；有学者运用激光共聚焦显微镜对柳杉（*Cryptomeria japonica*）和苦楝（*Melia azedarach*）的裂纹进行可视化研究初步揭示出其裂纹产生与水分的关系，发现其微裂纹萌生于纤维饱和点（fiber saturation point，FSP）附近，优先出现在射线薄壁细胞与其相邻细胞胞间层处，并随含水率降低沿射线细胞向生长轮边界扩展，裂纹在含水率达到 10% 左右扩展至最大[11−12]；Fu 等[13]采用数字图像相关技术对窿缘桉（*Eucalyptus exserta*）水分变化过程中木材表面的干缩应变进行了可视化测量，研究表明干缩应变从髓心到树皮呈抛物线分布，且心材干缩大于边材；Gao 等[14]采用该技术对马尾松（*Pinus massoniana*）的研究进一步指出，木材外表面的干缩应变高于内表面，并且表裂产生于心边材交界处及早晚材的过渡区。上述研究在揭示不同树种开裂机制方面取得了重要进展，并为本研究提供了坚实的理论基础与方法启示。然而，木材开裂是水分变化与干缩行为协同作用的结果，目前尚缺乏能够同步量化水分状态与全场应变分布，并关联其微观结构的系统研究。特别是对于人工林红锥木材这一具有显著心边材差异的树种，其多尺度结构干缩行为及其含水率变化对其开裂影响机制尚不明晰，因此，将木材水分变化与全场应变分析方法结合以探究其开裂机制十分必要。

本研究以人工林红锥木材为研究对象，借助非接触全场测量系统（VIC-3D）和低场核磁共振技术（low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR）同步耦合解析心边材裂纹产生、扩展和闭合过程中其全场应变分布、水分状态及含量变化，同时利用激光共聚焦显微镜（confocal laser scanning microscope，CLSM）和 X 射线小角散射（small-angle X-ray scattering，SAXS）对不同含水率的心边材纤维细胞形变及纤维素结构进行分析，进而从细胞和分子层面揭示裂纹形成机理，以期探索红锥木材开裂机制，旨在为人工林红锥木材开裂防治及其改性、干燥等相关工艺提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

人工林红锥产自中国广西壮族自治区，选用 25 年生红锥木材，从树干 1.3 m 处向下截取厚度约 30 mm 的圆盘 4 块，胸径约 260 mm，其中心材部分为距离髓心大约 0 ~ 8 cm 的区域，边材为距离髓心约 8 ~ 20 cm 的区域。将试样用保鲜膜包裹后置于冷藏室保鲜备用，心材与边材初始含水率分别约为 85% 与 75%。试验时，直接从冷藏状态圆盘中制备无缺陷试件，不同试验试件加工过程及其尺寸如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 全场应变分布表征

从冷藏状态的红锥圆盘上分别制备无缺陷心材和边材试件各 3 个，选取其中心材和边材试件各 1 个，采用滚轮式散斑制作方法在其横切面制备散斑（滚轮表面点的直径为 0.330 mm）。将制备好的散斑试件放置于电热鼓风干燥箱（DGX-8053，上海福玛实验设备有限公司）内进行烘干 8 h，温度设定 40 ℃，

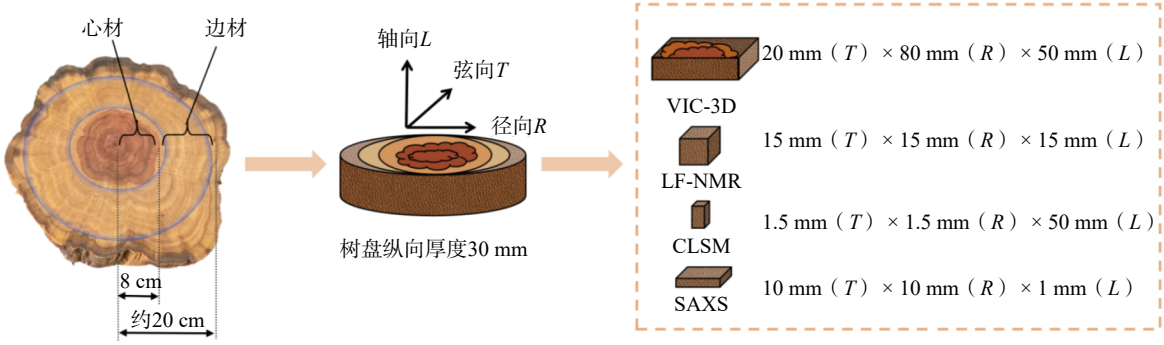


图 1 红锥试样加工过程示意

Fig. 1 Sawing method for specimens

并在干燥开始时同步使用非接触全场应变测量系统（VIC-3D，美国 CSI 公司）实时记录干燥箱中的试件横切面形变图像。在实验过程中，通过计算心边材试件上多组不同目标区域的像素位移获得应变数据，整个系统的应变测试范围为 0.005% ~ 2 000%。另将 4 个对照试件在相同条件下（40 ℃、8 h）进行常规干燥，并参照 GB/T 1927.4—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法第四部分：含水率测定》测量木材含水率变化。红锥心材和边材含水率随时间变化曲线如图 2 所示。

1.2.2　横向弛豫时间信号测定

为研究红锥木材开裂与其内部水分状态的关系，采用低场核磁共振分析仪（NMRC12-010V，上海纽迈科技有限公司）测试水分变化过程中木材横向弛豫时间（T_2）变化。从红锥圆盘上分别制备无缺陷心材与边材试件各 6 个，其中每组 3 个心材与边材试件进行低场核磁共振测试，测量其 T_2，以确保样品数据具有代表性。另外 3 对心边材作为对照试件通过烘干法在相同条件下测量木材含水率，使水分变化趋势与全场应变实验一致。将试件放置于温度为 40 ℃ 电热鼓风干燥箱中，常规干燥至目标含水率依次约为 80%、60%、40%、30%、20% 和 10%，试件达到不同目标含水率时，取出、室温冷却至平衡状态，再进行核磁共振测试。核磁共振分析仪采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）脉冲序列进行扫描，主频率为 20 MHz，90°和 180°脉冲宽度分别为 8 和 15.2 μs，增益为 20 dB，扫描累加次数为 32，重复等待时间 5 000 s。数据分析用 contin 软件进行 T_2 反演拟合，得到木材试件弛豫时间及对应峰值。

1.2.3　细胞干缩性测定

采用激光共聚焦扫描显微镜（LSM-980，卡尔蔡司股份公司）观察木材样品横切面木纤维细胞，使用 40 倍物镜，入射光波长为 488 nm。首先，利用轮

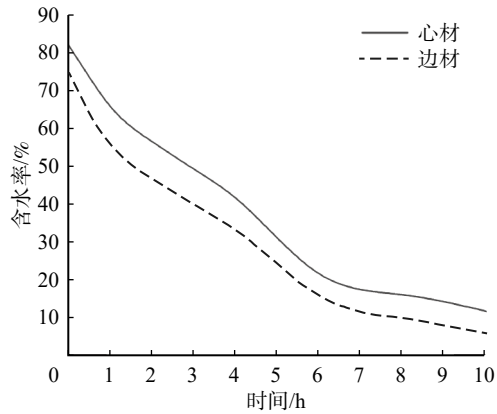


图 2　心边材含水率随时间变化趋势图

Fig. 2　Variation trend of moisture content of heartwood and sapwood

式切片机（Leica RM2235，德国徕卡仪器公司）将取自红锥圆盘的心材和边材试样横切面切平，并将其放置在 40 ℃ 烘箱中干燥，当试样干燥至含水率约为 60%、30%、15% 和绝干状态时，分别依次进行 CLSM 测试。然后利用 Image J 软件对图像进行处理，测量木材不同含水率状态下细胞的弦向和径向尺寸，并按照式（1）计算心边材细胞、细胞腔和细胞壁的干缩率，每组心材或边材组共测量 6 个样品，每个样品 10 个细胞，结果以平均值 ± 标准差表示，分析比较心材与边材在不同含水率下的干缩差异。

$$S = \frac{L_{\max} - L_0}{L_{\max}} \times 100\% \tag{1}$$

式中：S 为木材细胞弦向或径向干缩率，%；$L_{\max}$ 为生材状态下细胞弦向或径向尺寸，μm；L_0 为木材目标含水率时细胞弦向或径向尺寸，μm。

1.2.4　纤维素微纤丝间距测定

为了进一步探究红锥木材水分变化对其细胞壁的影响，对不同含水率条件下红锥试件开展小角 X 射线散射实验。利用小角 X 射线散射仪（Xeuss 2.0，法国赛普诺公司）测试红锥心边材试样，探测器到样品的距离为 1 188 mm，像素尺寸为 172 μm × 172 μm，分别测试在 40 ℃ 下烘干至含水率约为 60%、30%、15% 与绝干状态的同一试样的 SAXS 数据。利用 Fit2D.exe 软件处理原始数据，采用圆坐标法计算测试得到的标准样品散射信号来确定光斑中心；接着，利用 S.exe 软件扣除背底散射得到二维图谱后，通过积分将二维散射图像转化为一维散射曲线。最后，通过式（2）将一维曲线进行散射角的坐标转换得到 Kratky 曲线，再通过式（3）计算不同含水率阶段的细胞微纤丝间距[15]。

$$\boldsymbol{q} = \frac{4\pi \sin\theta}{\lambda} \tag{2}$$

$$d = \frac{2\pi}{\boldsymbol{q}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为 Kratky 曲线峰对应散射矢量，nm^{-1}；d 为相邻微纤丝圆柱体中心点间距，nm；θ 为入射 X 射线与散射方向夹角的一半；λ 为入射 X 射线的波长，nm。

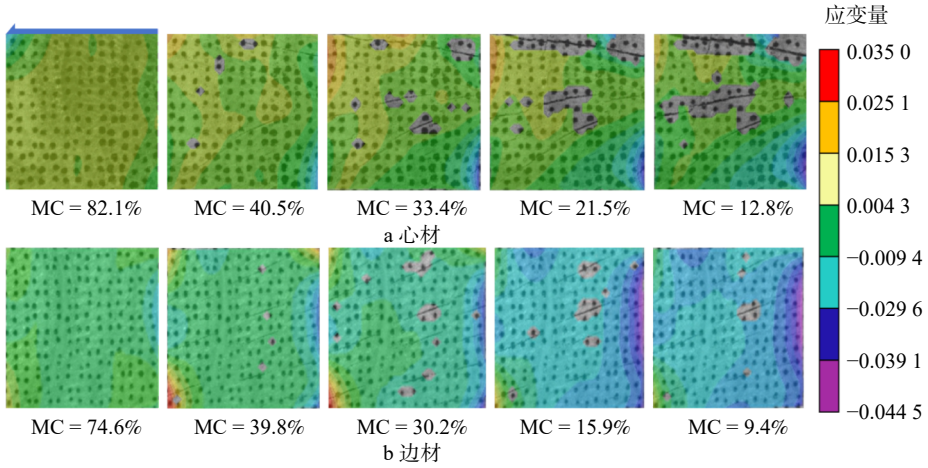
2　结果与讨论

2.1　水分作用下木材开裂与应变场分析

通过分析红锥木材横切面在不同含水率下的全场应变分布情况，得到裂纹生长随应变与含水率变化的动态演变过程。当心材含水率处于生材状态时（图 3a），木材表面未开裂，大部分区域显示为淡黄色，即湿胀状态；随着木材含水率降低，淡黄色区域随之减小并逐渐转变为绿色，代表着由湿胀状态转

变为干缩状态；与之相比，边材表面呈淡绿色(图 3b)，并且随着含水率降低逐渐转变为蓝色。当木材含水率在 40% 左右时，心材绿色区域开始产生少量径向微裂纹，随着含水率继续下降至 10% 左右，心材干缩应变从髓心向外颜色呈阶梯状分布，部分裂纹持续扩大，因散斑位移大于摄像机像素位移识别范围，裂纹附近呈现灰色，随着含水率进一步降低，部分裂纹闭合后灰色区域消失；边材干缩应变分布图颜色呈现整体均匀变化，微裂纹先增加后少量闭合，部分裂纹扩大。由此可见，红锥木材在含水率 40% 左右开始出现径向微裂纹，且部分裂纹不易闭合。

对红锥心材和边材各组 3 个试样的应变曲线分析表明，同组试样的弦、径向应变变化趋势基本一致，关键节点差异较小，表明实验重复性良好。由其全场应变分布得到的干缩应变曲线如图 4 所示，其中主应变为径向和弦向应变，负值和正值分别代表木材干缩应变和湿胀应变。从图中可以看出，红锥心材和边材的径向应变随时间变化的趋势相似，二者均缓慢增大，心材达到最大值−0.005 1，边材则为−0.004 8，二者差值 0.000 3，表明红锥心边材径向干缩应变较小且相近，这一现象可能与木射线对径向变形起抑制作用有关。与之相比，红锥心边材弦向干缩应变比径向应变更大，并且两者变化趋势存在差异，心材弦向干缩应变曲线先缓慢降低至木材含水率 40% 即干燥 3 h，之后曲线呈现快速下降趋势至−0.032 9，说明在该阶段之前，心材主要为自由水的蒸发，而后结合水才开始排出，导致 3 h 后干缩应变随含水率的降低线性增大；而边材在 1 h 后出现干缩现象，其应变曲线相对平缓下降至−0.022 4。该结果表明，心材比边材具有较大的干缩应变，这可能与红锥解剖构造和水分变化密切相关。与边材相比，心材的纤维细胞壁厚，结构致密[17]，初始含水率高，水分变化更大，因此该区域易出现较大应变[18]。心边材应变差异以及其弦向应变均大于径向，共同导致红锥开裂均为径向裂纹且心材呈现更多非闭合裂纹，这与其应变分布图中径向裂纹扩展、闭合趋势



应变量正值代表湿胀应变，负值代表干缩应变[16]；图中灰色区域为散斑位移大于摄像机像素位移识别范围。每张图像从右至左为髓心到树皮方向。

图 3 不同含水率(MC)状态下红锥心边材干缩应变分布图

Fig. 3 Distribution of shrinkage strain in the heartwood and sapwood of *Castanopsis hystrix* at different moisture contents

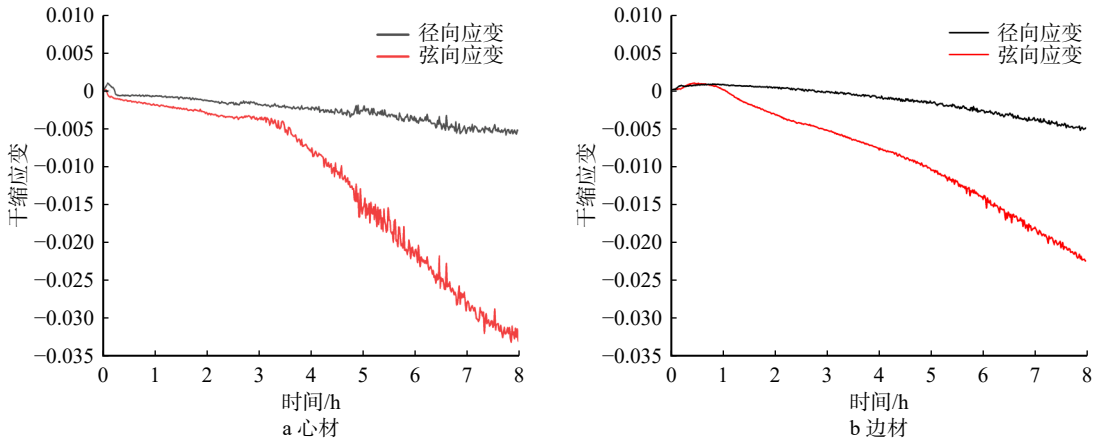


图 4 红锥心边材干缩应变曲线

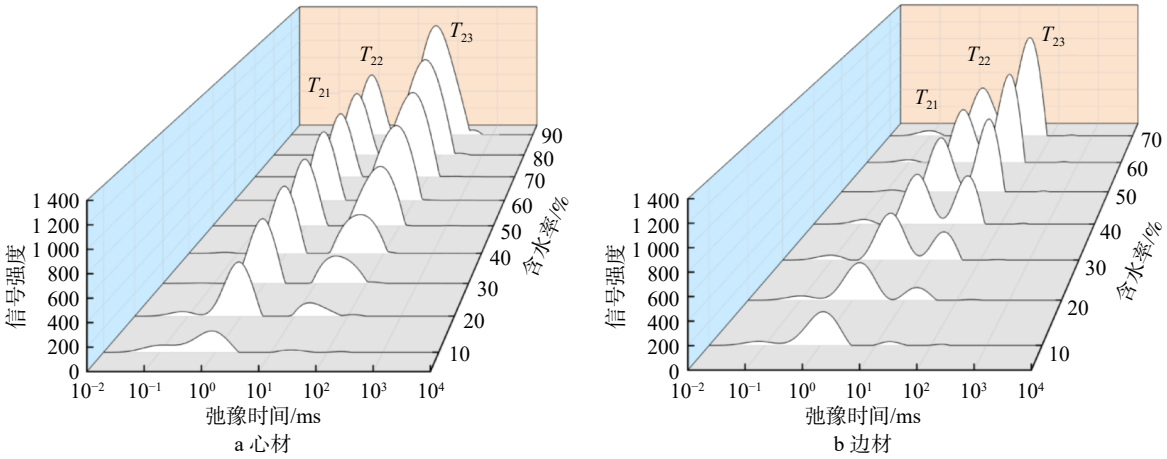
Fig. 4 Shrinkage strain curves of *Castanopsis hystrix* heartwood and sapwood

一致。

2.2　木材水分横向弛豫时间分析

采用低场核磁共振技术对心材和边材各 3 个试样的水分变化过程中 T_2 的变化进行分析发现，同组试样的弛豫峰位置、峰形及变化趋势一致（图 5）。不同弛豫峰代表不同状态的水分，峰的面积表示相应水分的含量，其中代表结合水的弛豫峰对应的弛豫时间为 T_{21} 和 T_{22}，自由水弛豫峰对应的弛豫时间为 T_{23}。通常，木材结合水的弛豫时间较短，峰顶点时间位于 0.1 ~ 10 ms 区间；自由水弛豫时间较长，峰顶点时间位于 10 ~ 100 ms 区间[19]。结果表明，红锥心材和边材在水分变化过程中均存在两个明显的弛豫峰，心材结合水与自由水的弛豫时间 T_{22} 和 T_{23} 分别为 0.98 和 38.72 ms，边材则为 1.96 和 29.33 ms。与边材相比，心材结合水的弛豫时间更短，表明其与木材结合更紧密，可能具有强度较大的氢键或存在于更受限的孔隙空间环境[20]，而自由水弛豫时间更长，说明其流动性较强，这与 Li 等[21]、Sun 等[22]在对多种木材中观察到的自由水弛豫行为一致。此外，边材在 0.1 ~ 0.15 ms 区间还存在一个弛豫时间更短的弛豫峰，其对应的横向弛豫时间为 T_{21}，而心材在 FSP 以下才出现该峰，说明存在与细胞壁结合更紧密的水分子。随着水分进一步排出，T_{21} 与 T_{22} 对应的信号峰逐渐靠近至合并，这表明两者虽代表不同结合强度的结合水，但可能处于水分动态平衡状态。这一现象也与 Bonnet 等[23]对新西兰花旗松（*Pseudotsuga menziesii*）木材吸湿研究中观察到的两种不同弛豫时间结合水及其动态变化行为相一致。

结合表 1 与表 2 可以发现，红锥心边材代表自由水的峰面积初始占比均在 65% 以上，随着木材含



T_{21}、T_{22}代表结合水弛豫峰对应的弛豫时间，T_{23}代表自由水弛豫峰对应的弛豫时间。

图 5　不同含水率状态下红锥心边木材横向弛豫信号强度变化

Fig. 5　Changes in transverse relaxation signal intensity of *Castanopsis hystrix* heartwood and sapwood at different moisture contents

表 1　红锥心材干燥过程横向弛豫信号峰特征参数

Tab. 1　Characteristic parameters of transverse relaxation signal peaks in *Castanopsis hystrix* heartwood during drying

干燥时间/h	T_{21}			T_{22}			T_{23}		
	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%
0				0.98	13 802.74	25.28	38.72	40 445.77	74.01
0.5				0.98	13 760.55	29.17	44.49	33 242.01	70.46
1.0				0.91	13 738.72	32.70	44.49	26 951.91	67.09
1.5				0.91	13 711.12	38.99	38.72	21 432.02	60.95
2.0				0.91	12 964.75	45.05	38.72	15 794.36	54.88
3.0	0.06	139.31	0.62	0.91	12 451.45	54.97	33.70	10 054.90	44.39
4.0	0.06	51.74	0.29	0.91	11 373.47	64.02	25.53	6 240.71	35.13
6.0	0.08	732.74	0.59	0.91	9 389.46	74.95	19.34	2 263.54	18.07
8.0	0.13	1 116.38	19.19	0.91	4 351.11	74.79	22.22	292.74	5.03

注：表中比例为弛豫谱中各特征峰面积占总面积的比例，即短弛豫峰（T_{21}与T_{22}）所代表的结合水，与长弛豫峰（T_{23}）所代表的自由水，在木材总水分中的占比。下同。

表 2 红锥边材干燥过程横向弛豫信号峰特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of transverse relaxation signal peaks in *Castanopsis hystrix* sapwood during drying

干燥时间/ h	T_{21}			T_{22}			T_{23}		
	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%	峰顶点时间/ms	峰面积	比例/%
0	0.10	1 142.77	3.07	1.96	11 790.39	31.61	29.33	24 301.07	65.15
0.5	0.10	511.87	1.71	1.96	11 371.79	37.96	23.82	18 014.48	60.14
1.0	0.14	255.51	1.03	1.70	11 040.68	44.43	20.73	13 506.58	54.35
1.5	0.11	786.65	4.03	1.59	10 249.08	52.45	19.34	8 453.06	43.26
2.0	0.09	893.48	5.89	1.59	9 641.02	63.58	18.04	4 579.81	30.20
3.0	0.09	801.48	7.82	1.38	7 538.17	73.62	16.83	1 834.49	17.92
4.0	0.08	684.65	9.20	1.12	6 303.72	84.70	14.65	383.15	5.15

水率下降，其峰顶点时间与峰面积均逐渐减小，至含水率达 10% 时基本蒸发殆尽，这表明红锥木材的自由水排出贯穿整个水分减少的过程，这可能因为自由水在木材内部分布不均，部分存在于渗透性较差的细胞组织中，使其排出过程较慢[24]。此外，边材自由水排出耗时 4 h，心材则需 8 h，这与心边材内部构造对水分迁移的阻碍差异相关[25]。在干燥初期（前 2 h），代表结合水的峰面积仅出现小幅度的减少，该阶段结合水蒸发缓慢，主要进行木材表层结合水的扩散；干燥进行到 3 h 后结合水峰面积才开始显著下降，表明内部结合水开始大量脱除。该结合水迁移过程呈现明显的阶段性规律，与 Xu 等[26]在杨木干燥中观察到的水分迁移动态过程一致。

综合 VIC-3D 应变分析与 LF-NMR 水分状态分析的结果，可以建立红锥木材干燥过程中水分演变与应变发展的耦合关系，进而阐明裂纹萌生与扩展的内在机制。即当木材试件干燥进行到 3 h，木材含水率降至 40% 左右时，心边材表面均开始产生少量微裂纹，这主要归因于：此阶段，木材芯表层存在明显的含水率梯度（芯层高于 40%，表层低于 FSP），含水率梯度产生的干燥应力超过木材弦向的抗拉强度极限，从而导致木材表面形成微裂纹[27]；当木材含水率从 40% 降至 10% 时，木材裂纹数量增加，其中部分裂纹呈现扩展或闭合趋势，这是由于该阶段自由水和结合水同时大量蒸发，蒸发面不断向木材内部移动，木材内部持续产生干燥应力，进而引起表层部分细裂纹不断扩展至难以愈合，同时部分微裂纹随着木材水分蒸发殆尽表层应力转向而使其闭合[28]。

2.3 木材细胞干缩形变分析

基于本团队前期研究人工林红锥木材在水分变化过程中的开裂以径裂为主，其主要产生于射线细胞与纤维细胞的胞间层处，偶尔也会发生在纤维细胞之间的胞间层处[7]。利用激光共聚焦显微镜可观察红锥木材在不同含水率条件下其纤维细胞形态尺寸变化，从细胞层面阐明水分对木材开裂行为的作用机制。图 6 显示：随着木材含水率降低，心边材纤维细胞均呈现干缩趋势，细胞壁由生材的均匀光滑变得皱缩；同时，细胞壁中部分木质素的荧光亮度略微降低或升高，这是由于随着细胞壁中水分迁移，部分细胞角隅和复合胞间层中木质素聚集或者稀释导致荧光强度变化[29]。

不同含水率状态下，红锥纤维细胞、细胞壁、细胞腔干缩情况如图 7 所示。结果表明，纤维细胞心边材的弦向、径向干缩率均随含水率降低而升高，并且同一含水率时，细胞弦向干缩率大于径向，与 Gao 等[30]对木材含水率损失过程中宏观和细胞两个层面的干缩研究结果一致。在相同含水率时，心材细胞的弦向、径向干缩率均大于相应的边材细胞，其中从生材到绝干材状态时，心材纤维细胞的弦向、径向干缩率分别为 6.42% 和 4.36%，边材为 5.80% 和 3.68%。为了进一步对比心边材纤维细胞干缩差异，如图 7 c 所示心材和边材的弦径向干缩比值均在 1～2 之间，表明心材和边材纤维细胞弦径向的干缩差异相近，弦径向干缩差异导致的应力区别不大，心边材裂纹主要受含水率梯度应力的影响。此外，由图 7d～f 可知，心边材纤维细胞壁也随木材含水率降低而收缩，并且心材细胞壁弦/径向干缩率也均大于边材；同时，细胞腔整体面积也呈收缩趋势，心边材细胞腔最大干缩率分别为 7.65% 和 6.43%。

综上所述，随着红锥木材含水率的降低，心边材纤维细胞及其细胞壁与细胞腔均呈现干缩趋势，其中当含水率 30% 接近木材纤维饱和点时，三者干缩率均较小；当含水率降至 30% 以下时，三者干缩率明显增加，这主要归因于木材含水率低于纤维饱和点时，细胞壁结合水开始显著蒸发，进而细胞壁微纤丝间距缩小，引发整体干缩[31]。同时，心材纤维细胞弦、径向干缩率大于边材，细胞弦向干缩率大于径向干缩率，从而可能引起木材易在细胞胞间层处产生

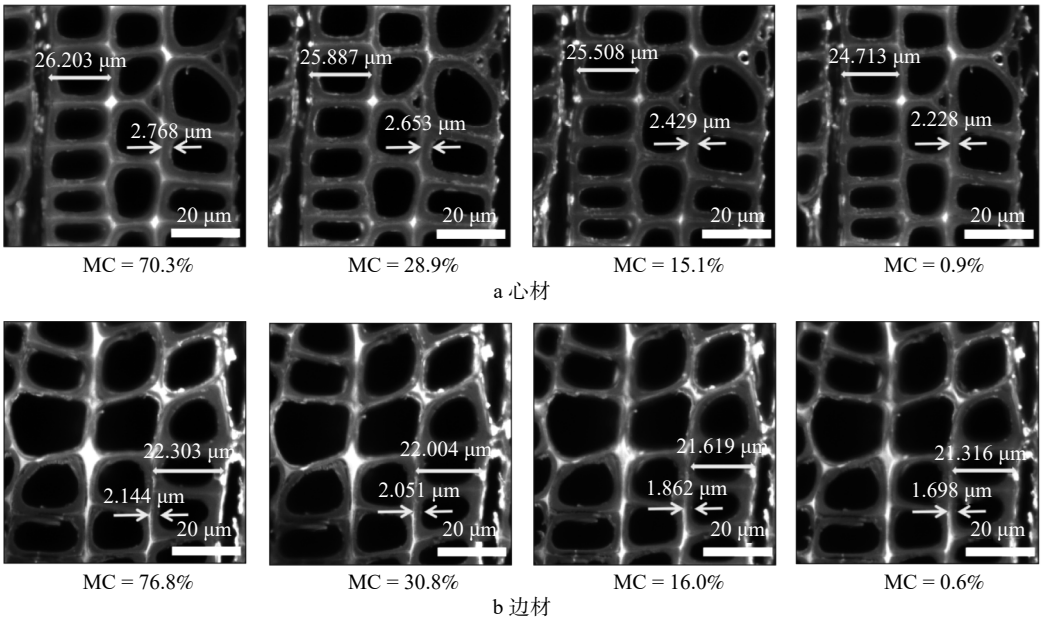
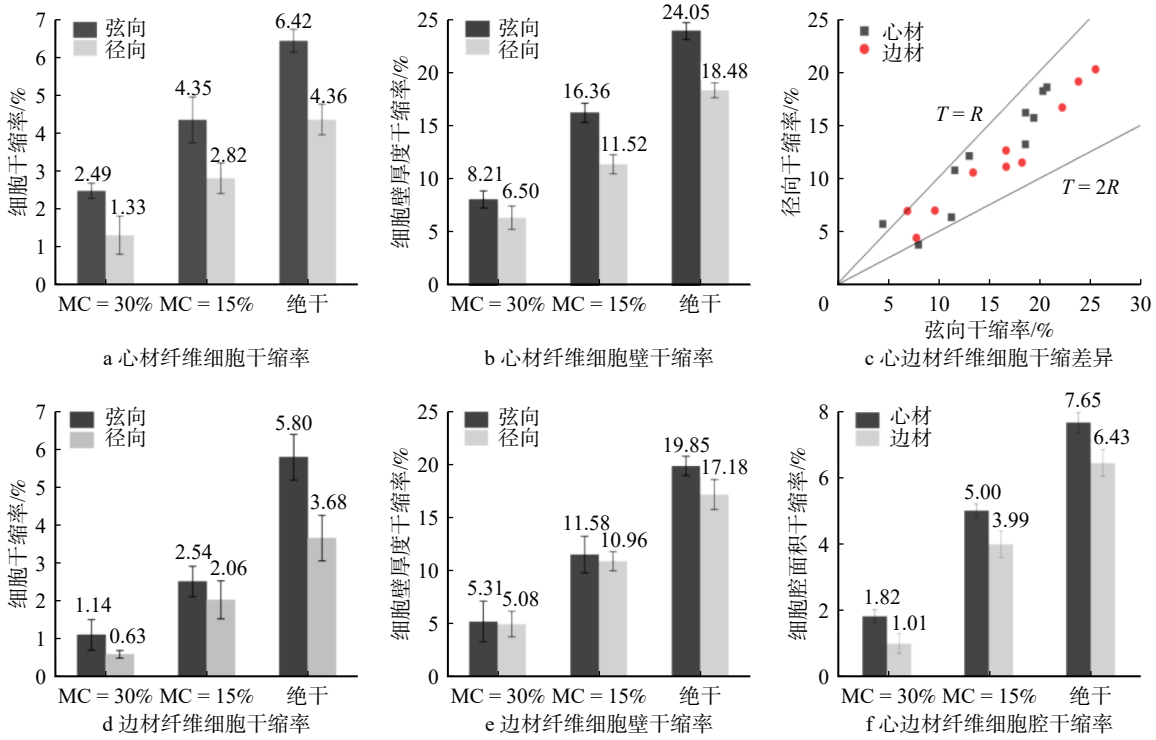


图 6　不同含水率条件下红锥纤维细胞 CLSM 图片

Fig. 6　CLSM images of fiber cells in heartwood and sapwood at different moisture contents



图c中，*T*代表纤维细胞的弦向干缩率（或尺寸变化），*R*代表纤维细胞的径向干缩率；*T* = *R*代表曲线图中弦向与径向干缩率相等的点（各向同性点）；*T* = 2*R*代表曲线图中弦向干缩率是径向干缩率两倍的关系线（各向异性点）。

图 7　不同含水率状态下红锥心边材细胞干缩率

Fig. 7　Shrinkage of cells in heartwood and sapwood at different moisture content

径裂，并且导致心材径向裂纹更易扩展形成难以闭合的大裂纹。

2.4　水分变化对木材细胞壁微纤丝结构的影响

由图 8a，b 可知，随木材含水率的降低，心材与边材的 X 射线散射图像光晕均呈现增强趋势，且在含水率 30% 以下变化更加显著。这主要源于结合水的脱除：水分的减少使细胞壁内微纤丝之间的氢键作用增强，从而令纤维素骨架排列更为有序，取向度升高[32−33]。同边材相比，心材散射图像光晕同样增加，但图像形状由各项异性圆形光晕沿着纤维轴向拉伸，变成扁平图样。

红锥心边材不同含水率状态下的 SAXS、Kratky 曲线和微纤丝间距变化如图 9。不同含水率心边材 SAXS 曲线均在散射矢量 q 值 0.10 ~ 0.20 区间呈现

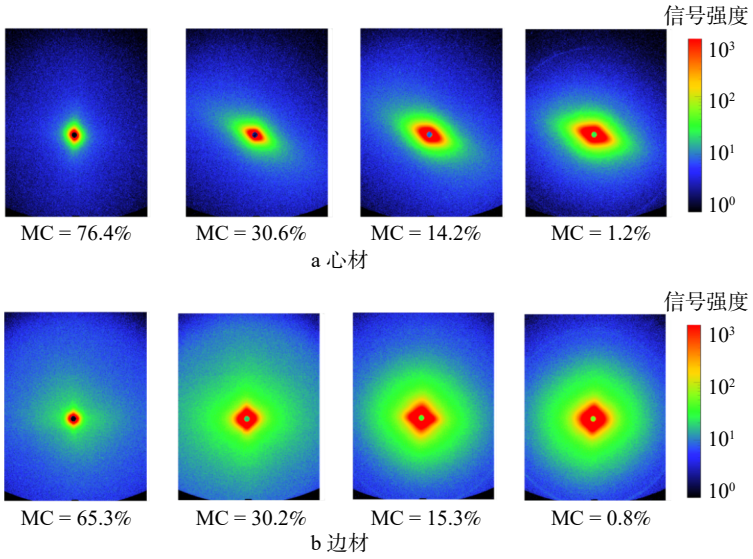
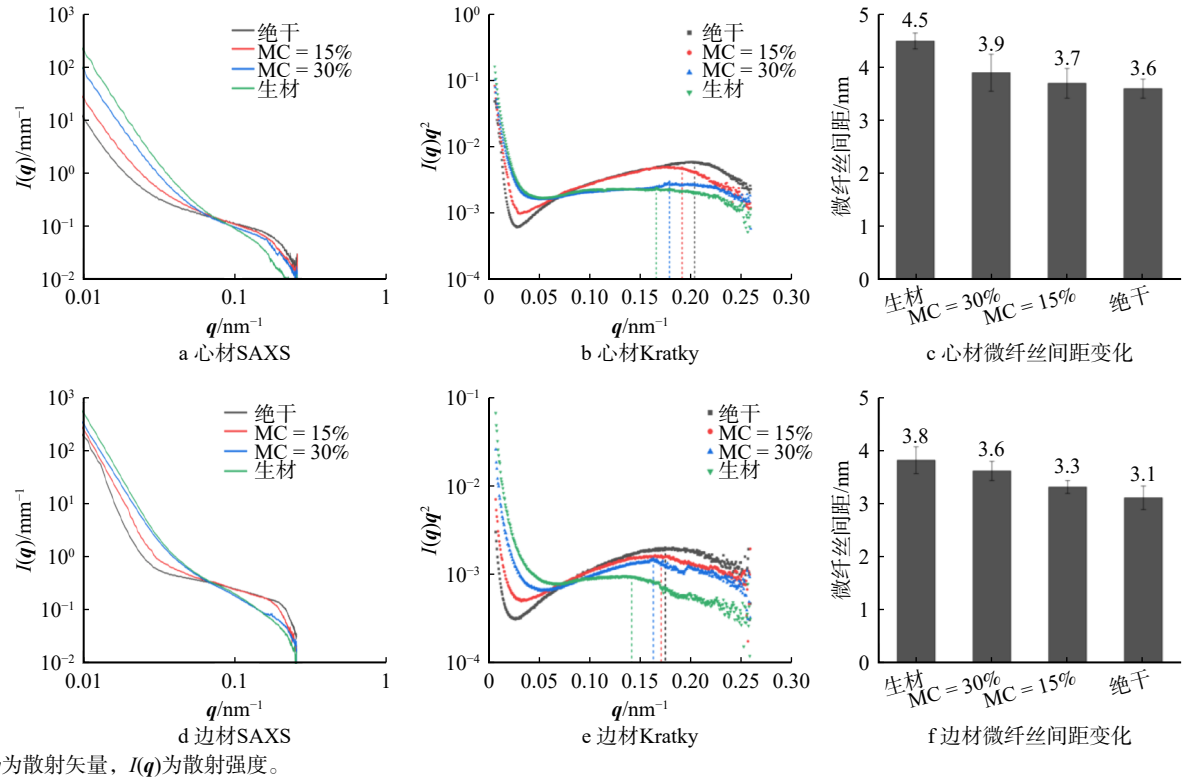


图 8 红锥心边材不同含水率的二维 SAXS 图像

Fig. 8 SAXS images of heartwood and sapwood at different moisture contents

宽阔的肩部特征，但对应散射强度不同，并且在 Kratky 曲线相同区间中出现不同峰值，该峰值对应的散射矢量 $\boldsymbol{q}$ 可用于估算相邻纤维素微纤维之间的平均距离[34]。随着含水率降低，Kratky 曲线峰逐渐向散射矢量低值移动，通过计算可得红锥心材含水率在生材、30%、15% 和绝干时的微纤丝间距 d，分别为 4.5、3.9、3.7 和 3.6 nm；边材微纤丝间距 d 分别为 3.8、3.6、3.3 和 3.1 nm，这主要由于随着木材水分蒸发，微纤丝间水层变薄而相互靠拢，微纤丝间距缩小，进而可能引起细胞壁尺寸发生变化[35]。同时，对比心边材微纤丝间距变化，相同含水率条件下心材细胞微纤丝间距大于边材，并且心边材含水率从饱水状态至 30%、15% 和绝干，心材纤维丝间距分别减小 13.3%、17.8% 和 20.0%，而边材减小了 5.3%、15.2% 和 18.4%，由此可见心材微纤丝间距变化大于边材，这也与上述心边材纤维细胞干缩形变结论一致。



$\boldsymbol{q}$为散射矢量，$I(\boldsymbol{q})$为散射强度。

图 9 不同含水率状态下红锥心材 SAXS 曲线与 Kratky 曲线及微纤丝间距变化图

Fig. 9 SAXS curves, Kratky curves, and variations in microfibril spacing at different moisture content

3 结　　论

本研究以人工林红锥木材为对象，将非接触全场应变测量与低场核磁共振技术同步耦合，同步考察了红锥心边材裂纹变化过程中其全场应变分布、水分状态及含量变化情况，同时从细胞和分子层面探究了不同含水率状态下红锥心边材纤维细胞形态和微纤丝结构变化规律。主要结论有以下 3 点。

（1）研究揭示了红锥木材在水分变化过程中的全场干缩应变分布规律。随着木材含水率降低，全场干缩应变自髓心向边材呈现阶梯状递减分布，心材应变大于边材，弦向应变大于径向，二者最大应变差值 0.009 5；当含水率降到 40% 左右时，心边材开始出现径向微裂纹，并且随含水率降低与弦向应变增大，裂纹先扩展至缓慢闭合，但绝干时心材表面仍留有更多非闭合裂纹。

（2）通过对红锥木材水分变化产生的横向弛豫时间（T_2）分析，明确了木材开裂与结合水的排出密切相关。当含水率降到 40% 左右时，少量表层结合水排出，木材表面呈现微裂纹；随着内部结合水进一步排出，裂纹持续扩展，至结合水蒸发殆尽，部分裂纹闭合。

（3）从细胞和分子层面揭示了心边材开裂差异的微观机制。随着含水率降低，红锥心边材纤维细胞、细胞壁和细胞腔都呈干缩趋势，三者弦向干缩率均大于径向，心材细胞弦、径向干缩率均大于边材；在该过程中，心边材纤维素结构发生改变，心材微纤丝间距变化比边材大，且心材纤维取向度产生变化。

本文通过对人工林红锥木材多尺度分析，揭示了人工林红锥木材的开裂是由水分变化诱发的多尺度干缩行为协同作用的结果。然而，该研究的局限性在于未考虑人工林红锥木材自身生长应力释放对其裂纹形成的影响，未来研究可量化生长应力与干燥应力对木材开裂变形的协同作用。本研究将为人工林红锥木材开裂防治及其改性、干燥等加工利用技术提供理论依据，推进国产珍贵人工林木材加工利用，以期实现进口木材替代。

参　考　文　献

[1] 李志辉, 李柏海, 祁承经, 等. 我国南方珍贵用材树种资源的重要性及其发展策略 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(11): 1−8.
Li Z H, Li B H, Qi C J, et al. Studies on importance of valuable wood species resources and its development strategy[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(11): 1−8.

[2] 刁海林, 蔡道雄, 姜金英, 等. 红锥干燥特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(18): 10867−10869.
Diao H L, Cai D X, Jiang J Y, et al. Research on the drying characteristics of *Castanopsis hystrix* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(18): 10867−10869.

[3] 陈炎, 孟素戎, 黄安民, 等. 三聚氰胺−尿素−乙二醛树脂浸渍改性对人工林红锥木材物理力学性能的影响 [J]. 林业科学, 2025, 61(1): 166−175.
Chen Y, Meng S R, Huang A M, et al. The influence of melamine-urea-glyoxal (MUG) resin impregnation modification on the physical and mechanical properties of *Castanopsis hystrix* wood [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(1): 166−175.

[4] 刘光金, 贾宏炎, 徐建民. 干燥温度对红锥树盘材色变化及干燥缺陷的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(4): 83−92.
Liu G J, Jia H Y, Xu J M. Effects of temperature on color change and drying defects of *Castanopsis hystrix* wood [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 83−92.

[5] 吕建雄, 林志远, 骆秀琴, 等. 红锥和西南桦人工林木材干缩特性的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 6−9.
Lü J X, Lin Z Y, Luo X Q, et al. Shrinkage characteristics of *Castanopsis hystrix* and *Betula alnoides* plantation wood [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(1): 6−9.

[6] 刁海林, 白灵海, 唐贤明, 等. 红锥锯材中试干燥工艺 [J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(2): 240−244.
Diao H L, Bai L H, Tang X M, et al. Pilot test drying process for *Castanopsis hystrix* lumber [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(2): 240−244.

[7] Meng S, Su Y, Huang A, et al. Radial cracks in *Castanopsis hystrix* wood and its dimensional stability improvement by resin-impregnated modification [J]. Holzforschung, 2023, 77(11-12): 889−899.

[8] Fu Z, Chen J, Zhang Y, et al. Review on wood deformation and cracking during moisture loss [J]. Polymers, 2023, 15(15): 3295.

[9] Thybring E E, Fredriksson M, Zelinka S L, et al. Water in wood: a review of current understanding and knowledge gaps [J]. Forests, 2022, 13(12): 2051.

[10] Senni L, Caponero M, Casieri C, et al. Moisture content and strain relation in wood by Bragg grating sensor and unilateral NMR [J]. Wood Science and Technology, 2010, 44(1): 165−175.

[11] Sakagami H. Microcrack propagation in transverse surface from heartwood to sapwood during drying [J]. Journal of Wood Science, 2019, 65(1): 33.

[12] Sakagami H, Matsumura J, Oda K. In situ visualization of hardwood microcracks occurring during drying [J]. Journal of Wood Science, 2009, 55(5): 323−328.

[13] Fu Z, Weng X, Gao Y, et al. Full-field tracking and analysis of shrinkage strain during moisture content loss in wood [J]. Holzforschung, 2021, 75(5): 436−443.

[14] Gao Y, Fu Z, Zhou Y, et al. Moisture-related shrinkage behavior of wood at macroscale and cellular level [J]. Polymers, 2022, 14(22): 5045.

[15] Penttilä P A, Altgen M, Carl N, et al. Moisture-related changes in

the nanostructure of woods studied with X-ray and neutron scattering[J]. Cellulose, 2020, 27(1): 71−87.

[16] Liu J, Liu W, Tan R, et al. Drying strain behavior of elm earlywood and latewood with digital image correlation method [J]. Drying Technology, 2023, 41(5): 746−753.

[17] 成俊卿, 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
Cheng J Q. Wood records of China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992.

[18] Larsen F, Ormarsson S. Numerical and experimental study of moisture-induced stress and strain field developments in timber logs [J]. Wood Science and Technology, 2013, 47(4): 837−852.

[19] 朱晓风, 赵芝弘, 谭蕊, 等. 利用单边核磁共振研究樟子松木材干燥水分迁移规律 [J]. 波谱学杂志, 2024, 41(2): 173−183.
Zhu X F, Zhao Z H, Tan R, et al. Water migration characteristics of *Pinus sylvestris* during the drying process studied by single-sided nuclear magnetic resonance [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2024, 41(2): 173−183.

[20] El Hachem C, Abahri K, Leclerc S, et al. NMR and XRD quantification of bound and free water interaction of spruce wood fibers [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 120470.

[21] Li J, Ma E. 2D time-domain nuclear magnetic resonance (2D TD-NMR) characterization of cell wall water of *Fagus sylvatica* and *Pinus taeda* L [J]. Cellulose, 2022, 29(16): 8491−8508.

[22] Sun F, Chen K, Tan Y, et al. Characterization of stable and unstable states of moisture in wood during sorption by low-field NMR [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 210: 118109.

[23] Bonnet M, Courtier-Murias D, Faure P, et al. NMR determination of sorption isotherms in earlywood and latewood of Douglas fir. identification of bound water components related to their local environment [J]. Holzforschung, 2017, 71(6): 481−490.

[24] Passarini L, Malveau C, Hernandez R E. Water state study of wood structure of four hardwoods below fiber saturation point with nuclear magnetic resonance [J]. Wood and Fiber Science, 2014, 46(4): 480−488.

[25] Žlahtič-Zupanc M, Lesar B, Humar M. Changes in moisture performance of wood after weathering [J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 529−538.

[26] Xu K, Lu J, Gao Y, et al. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance [J]. Drying Technology, 2017, 35(15): 1909−1918.

[27] Yamamoto H, Sakagami H, Kijidani Y, et al. Dependence of microcrack behavior in wood on moisture content during drying [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2013, 2013: 802639.

[28] Sakagami H, Tsuda K, Matsumura J, et al. Microcracks occurring during drying visualized by confocal laser scanning microscopy [J]. IAWA Journal, 2009, 30(2): 179−187.

[29] 刘苍伟, 苏明垒, 周贤武, 等. FTIR 及 CLSM 对转基因杨木细胞壁木质素含量及微区分布研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3404−3408.
Liu C W, Su M L, Zhou X W, et al. Analysis of content and distribution of lignin in cell wall of transgenic poplar with Fourier infrared spectrum (FTIR) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(11): 3404−3408.

[30] Gao Y, Zhou Y, Fu Z. Interdependence of shrinkage behavior between wood macroscopic and cellular level during moisture content loss [J]. Drying Technology, 2022, 40(15): 3241−3248.

[31] 李韵珂, 栗振鑫, 张语桐, 等. 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 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(12): 121−131.
Li Y K, Li Z X, Zhang Y T, et al. Water-induced effects of matrix in wood cell wall on cellulose crystalline structure [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12): 121−131.

[32] Chen P, Li Y, Nishiyama Y, et al. Small angle neutron scattering shows nanoscale PMMA distribution in transparent wood biocomposites [J]. Nano Letters, 2021, 21(7): 2883−2890.

[33] 王世钧, 张玉霖, 陈琦. 毛竹干燥过程中水分变化对其纤维素结晶结构的影响 [J]. 木材科学与技术, 2024, 38(5): 32−38.
Wang S J, Zhang Y L, Chen Q. Effect of moisture content changes on cellulose crystal structure during moso bamboo drying [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2024, 38(5): 32−38.

[34] Virtanen T, Penttilä P A, Maloney T C, et al. Impact of mechanical and enzymatic pretreatments on softwood pulp fiber wall structure studied with NMR spectroscopy and X-ray scattering [J]. Cellulose, 2015, 22(3): 1565−1576.

[35] Paajanen A, Zitting A, Rautkari L, et al. Nanoscale mechanism of moisture-induced swelling in wood microfibril bundles [J]. Nano Letters, 2022, 22(13): 5143−5150.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）