

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240287

## 木材微观结构分析方法与特征参数

漆楚生 詹志斌 戴璐

(木质材料科学与应用教育部重点实验室(北京林业大学), 北京 100083)

**摘要:**木材是一种多尺度、高度各向异性的天然高分子材料,其由纤维素、半纤维素和木质素等成分构成复杂的三维网络结构。这些结构是决定木材微观与宏观物理力学性能的关键因素,木材的微观结构和主要特征参数对于理解木材性质、木材改性以及加工利用具有重要意义。本文综合分析了木材微观结构的分析方法,并归纳总结了其主要特征参数。在分析方法方面,显微观察、X 射线照相及衍射分析、计算机断层扫描等技术被广泛应用,结合数据采集以及二维和三维成像方法,可以重建木材的微观结构模型,进而测量微观结构的特征参数。重建的结构模型能够更清晰地揭示木材的微观形貌特征。木材的微观特征参数主要包括细胞结构特征参数、孔隙率和纤维素微纤丝参数等。目前微观结构的观测研究多集中在微米尺度,而对于纳米尺度以及更小分子尺度结构的分析,主要依赖于理论模拟。因此,能够直接观察和表征这些更小尺度结构的分析方法有待进一步研发。

**关键词:**木材;微观结构;特征参数;显微分析;micro-CT

**中图分类号:**S781.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2025)03-0007-12

**引文格式:**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 Chusheng, Zhan Zhibin, Dai Lu. Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 7-18.

### Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure

Qi Chusheng Zhan Zhibin Dai Lu

(Key Laboratory of Wood Material Science and Application (Beijing Forestry University),  
Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Wood is a multi-scale and highly anisotropic natural polymer material, which consists of cellulose, hemicellulose, lignin and other components of a complex three-dimensional network structure. These structures are the key factors affecting micro-macroscopic physical and mechanical properties of wood, and the microstructure and main characteristic parameters of wood are of great significance to the understanding of properties of wood as well as wood modification and processing and utilization. This paper comprehensively analyzes the methods of wood microstructure analysis and summarizes its main characteristic parameters. In terms of analytical methods, microscopic observation, X-ray radiography and diffraction analysis, computed tomography and other technologies were widely used, combined with data acquisition and two-dimensional and three-dimensional imaging methods, can reconstruct wood microstructural models, measure microstructural parameters, and reconstructed structural models revealed clearer micro-morphological features. The microstructural parameters of wood mainly include cellular structure parameters, porosity, cellulose microfibrils and other parameters of wood. At present, the observation and study of microstructure is mostly limited to the micron scale, and the analysis of nanoscale

收稿日期: 2024-08-30 修回日期: 2025-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2200501)和山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2024086)。

第一作者: 漆楚生, 教授。主要研究方向: 木结构材料与建筑。Email: qichusheng@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者: 戴璐, 副教授。主要研究方向: 木结构材料与建筑。Email: dailu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and smaller molecular scale structure is mainly based on theoretical simulation, and the structural analysis methods that can be directly observed and characterized need to be further studied in depth.

**Key words:** wood; microstructure; characteristic parameter; microscopic analysis; micro-CT

木材是一种天然的高分子材料,其特点是具有多层次结构(图1),从宏观到微观的所有层次的结构均作用于木材的宏观特征,从而影响宏观木材的物理力学性能。木材的微观结构分析研究可以更好地探明其生物结构特征和性质,最初观察木材微观结构的方法主要是观察木材解剖切片,随着技术的发展,在探索角度和深度方向不断延展,一些新型、高效的测试表征方法逐渐应用于研究中,测试表征方法主要包括光学显微镜、电子显微镜、光谱-显微联用分析以及X射线显微计算机断层扫描(X-ray micro computed tomography, X $\mu$ CT)技术, X $\mu$ CT能够以更高分辨率对木材微观结构进行微米级成像。通过木材微观分析技术方法的更迭和改进,可进一步观察木材微观尺度下的形貌特征,通过数据采集和二维、三维的有效成像,从而精准且无损地测量得到木材内部导管直径、导管表面积、导管密度、空隙体积分数(孔隙率)、微纤丝角(microfibril angle, MFA)等微观结构数据,为在不同微宏观尺度下木材物理力学性能的分析提供关键参数,为木材微观力学模型构建和分析提供重要依据。

## 1 木材微观结构表征方法

木材微观结构特征的表征方法根据观察分析参数的种类不同,分为二维空间结构特征分析方法、木材纤维素晶体结构及微纤丝角参数分析方法、三维空间结构特征分析方法,并针对得到的数据开发了不同的采集分析及2D和3D成像方法,共同表征木材的多层级形貌结构和特征参数。

### 1.1 二维平面结构特征分析方法

二维平面结构分析方法包括光学显微镜、电子显微镜、原子力显微镜和光谱-显微联用分析等,各类

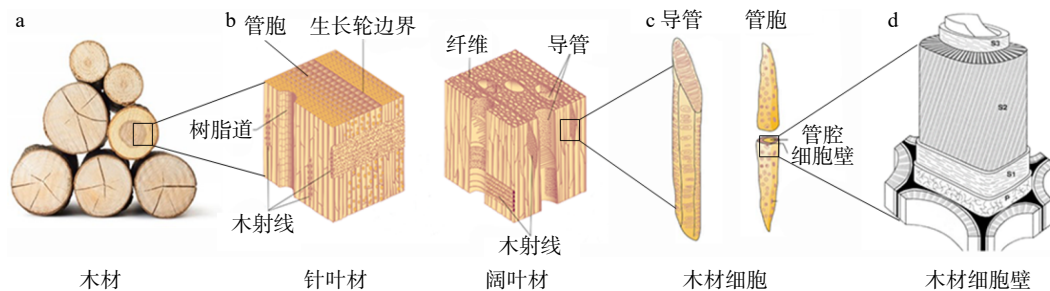
显微观察的样品制备方法和观测参数<sup>[2-12]</sup>如表1所示。

#### 1.1.1 光学显微镜

最初观察木材微观结构是使用光学显微镜对木材解剖切片进行显微观察,这是一类简便易行的方法,尽管其在分辨率和细节捕捉能力等方面与电子显微镜仍存在差距,但其可观测大尺度样品,适用于多种场景,如Li等<sup>[2]</sup>使用配备紫外光源的光学显微镜,观察了花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)茎细胞壁和细胞腔等微观结构,测得了木材细胞双层壁厚和沿切线方向细胞腔的直径。

#### 1.1.2 电子显微镜

随着显微观察技术和解剖切片水平的发展,电子显微镜(electron microscope, EM)以其能够提供达纳米级别的分辨率被用于观测木材细胞壁、导管、纤维等微观结构特征。电子显微镜有较强的表面探测能力,可观察到表面的微小纹理、孔隙和凹凸,对研究木材表面形貌和粗糙度变化有重要的实际意义。电子显微镜对观测样品的导电率有较高要求,一般需要在真空环境中对样品进行金属涂覆,当需要对比木材改性处理前后特征时,此方法有明显优势。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)是最常见的EM,能对木材的二维微观结构进行分析表征,如Wang等<sup>[3]</sup>使用SEM对样品压缩前后微观结构进行可视化处理,研究了早材和晚材对热改性花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)压缩应力的影响。方旋等<sup>[4]</sup>使用SEM观察老化杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的微观结构变化,从横切面可见,老化杉木由外到内管胞被压缩得越来越紧密,且早材的压缩程度明显比晚材更严重。王瑜瑶等<sup>[5]</sup>使用SEM观测杨树(*Populus euramericana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)细胞横切面微观结构,探究不同的预处理



a. 木材; b. 针、阔叶材结构示意图; c. 木材细胞; d. 典型木材细胞壁的壁层构造示意图<sup>[1]</sup>

图1 木材多层次结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-layer structure of wood

表1 二维平面结构特征分析方法

Tab. 1 Analysis method for two-dimensional planar structural features

显微观察设备	测试参数类型	测试样品树种	样品制备方法	测试样品尺寸	分辨率/ 放大倍率	引用
配备紫外光源的 光学显微镜	木材微观结构、 木质复合材料胶 黏剂分布	花旗松 ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	切下 100 mm × 10 mm × 2.8 mm 的木块, 在 20 °C 和 65% 相对湿度下进行预处理, 使用热压机制成双层板后制成样品。在质 量分数 0.05% 甲苯胺蓝溶液中染色 5 min, 并在质量分数 30% 乙醇中清洗 20 min 进 行脱水, 最后用甘油密封在盖玻片上	5 mm × 3 mm × 20 μm		[2]
	管胞的形状、数 量和分布	欧洲山毛榉( <i>Fagus sylvatica</i> )、胡桃木 ( <i>Juglans regia</i> )等	用刀片将木材样品切成棱柱状, 放入乙醇 中脱水, 使用液态 CO <sub>2</sub> 进行干燥, 镀金后 进行测试	0.5 cm × 0.5 cm × 0.1 cm	1 500 ×	[12]
扫描电子显微镜	压缩前后木材的 微观结构	花旗松 ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	在 65% 相对湿度和 20 °C 下预处理木块, 将样品分为 3 组: 一组作为对照, 另两组 分别在 180 和 210 °C 饱和蒸汽下处理 2 h, 在 103 °C 下烘干 5 h 后进行测试	10 mm × 10 mm × 3.5 mm(晚材) 10 mm × 10 mm × 6.5 mm(早材) 10 mm × 10 mm × 10 mm(早材和晚材)		[3]
	细胞壁纹孔	香椿 ( <i>Toona sinensis</i> )	用边材制样, 在 103 °C 下烘干, 样品分成两 组, 一组用亚麻籽油进行真空浸渍, 另一 组作为对照, 处理后将样品风干 7 天至亚 麻籽油固化	20 mm × 20 mm × 20 mm	5 μm	[6]
原子力显微镜	木材老化前后的 显微特征	挪威云杉 ( <i>Picea abies</i> )	从风干的木材中径向切下 10 个 45 mm × 6.5 mm × 10 mm 的样本, 其中 5 个样本在 紫外线气候箱中进行加速老化	5 mm × 5 mm × 5 mm		[8]
	不同切割木材的 粗糙度	异味豆 ( <i>Dinizia excelsa</i> )	将材料沿纹理方向切成 35 cm 厚的圆片, 再沿着正交方向切割成边长为 2 cm 的立 方体试样, 用 1 200 目的砂纸抛光并在超 声波清洗器中去除杂质, 并在 45 °C 下烘干	2 cm × 2 cm × 2 cm	10 μm	[7]
紫外可见光谱 仪、傅里叶变换 红外光谱仪	木材烧焦表面碳 水化合物的降解	云杉 ( <i>Picea asperata</i> )	将 190 mm × 24 mm × 4 000 mm 的锯材板 进行预干燥, 后用两种不同的炭化方法进 行表面处理		4 cm <sup>-1</sup>	[9]
傅里叶变换红外 光谱仪	木材细胞壁成分 的化学结构	落叶松 ( <i>Larix gmelinii</i> )	从木材的表面和内部采集样本, 并使用超 微切片机制备样本	15 μm(厚度, 横切面)	8 cm <sup>-1</sup>	[11]

方法对细胞壁孔隙结构的影响。Liu 等<sup>[6]</sup>采用 Quanta 200 型 SEM 获得了亚麻籽油浸渍前后香椿(*Toona sinensis*)木材样品的表面形貌特征变化。另外透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)也是一种 EM, 主要用于分析表征木材三维纳米级空间结构, 将在下文分析。

电子显微镜的分辨率远高于光学显微镜, 能够观察到纳米级的木材微观结构, 可以清晰显示木材细胞腔、导管、纹孔等微观结构。但缺点在于样品需经过包埋、切片(适用于 TEM)或金属喷镀(适用于 SEM)等制备过程, 可能导致样品结构的轻微变化或损伤, 另外由于较长时间高能电子束的照射, 木材样品可能会受到辐射损伤或局部碳化。

### 1.1.3 原子力显微镜

观察木材纳米级别的表面形貌特征通常使用原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)。AFM 是一种高分辨率的显微技术, 通过探针的微触碰进行表面成像, 可在样品的天然状态下进行观察, 并且可以多次测量同一区域。如 Conceição 等<sup>[7]</sup>使用 AFM 和光学显微镜探明了小尺度异味豆(*Dinizia excelsa*)

的粗糙度和表面形貌; Mao 等<sup>[8]</sup>开发了一种基于 AFM 精准探究木材老化的方法, 通过观察木材微观表面的变化及其相对于 AFM 探针的黏附力测量, 表明木材纹孔是最容易老化的微观结构。AFM 可表征木材表面超微结构特征, 还可通过多模式(如接触模式、非接触模式)测量木材样品的机械特性(如硬度、弹性模量)和表面化学特性(如黏附性)。AFM 的缺点主要是样品表面需要尽可能平整, 否则容易引起探针跳跃或信号失真, 影响成像质量, 制作样品时对木材不规则表面处理难度较大。

### 1.1.4 光谱-显微联用分析

观察木材化学结构通常使用光谱技术与显微成像方法联合的方法, 紫外共振拉曼光谱(ultraviolet resonance Raman spectroscopy, UVRR)和傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)是两种常用于观察木材化学结构的光谱技术。Ebner 等<sup>[9]</sup>使用 UVRR 和 FTIR 与 X<sub>μ</sub>CT 相结合的方法对比了两种杉木表面炭化方法产生的化学结构差异, 结合计算机显微断层扫描(micro computed tomography, micro-CT)图像进一步揭示了两种炭化

方法影响木材形态结构的作用机制。Kanbayashi 等<sup>[10]</sup>使用配备光学显微镜的共焦显微拉曼系统观测木材聚合物的微观分布和局部化学变化,进而评估木材防腐涂层的各成分在细胞尺度上的分布。

FTIR 光谱可解析不同形式的木材样品,如 Guo 等<sup>[11]</sup>结合成像 FTIR 显微镜与 X 射线照相获得的 CCD 图像对木结构古建筑中花拱的木材表面和内部采集的木粉样品进行测试,揭示了距今约 690~790 年的考古木材细胞壁成分及其吸湿性变化规律;基于 CCD 相机图像,对 FTIR 光谱得出的吸光度图像进行处理,分析样品之间的化学成分差异,分析结果表明考古木材中羧酸成分流失,反映了考古木材样品与对照木材之间的差异。大多数光谱技术(如红外光谱、拉曼光谱)对木材样品基本无损伤,可以在天然状态下直接检测木材中分子或原子层面的化学组分。其缺点在于对于复杂的木材化学结构分析的分辨率较低,实现定量分析的精准度有限,设备的技术成本和维护成本较高。

综上,不同显微技术对木材局部结构参数的获取能力各具特点,光学显微镜适合大范围观察木材截面,可测量细胞壁厚度和细胞腔直径,操作简单;电子显微镜具有纳米级分辨率,可分析导管纹孔、细胞壁厚度等;AFM 可扫描木材表面三维形貌,研究粗糙度和表面超微结构。此外,光谱结合显微成像的技术可表征细胞壁成分和化学结构变化。

## 1.2 木材微纤丝角和纤维素晶体结构分析方法

木材中含有大量的纤维素,是木材重要的化学组成成分,对木材纤维素晶体结构进行分析能够更好地探明微宏观结构特征和性质,如纤维素的晶体空间结构、晶格参数(如晶胞参数)等。木材细胞壁中的微纤丝角度是决定细胞壁力学性能的重要因素,木材纤维素晶体结构及微纤丝角参数分析的样品制备方法、大小和观测参数如表 2 所示。

木材细胞壁中微纤丝角通常使用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)方法和透射电子显微镜进行分析。Yin 等<sup>[14]</sup>和 Svedström 等<sup>[16]</sup>使用 XRD 方法分别测得杉木管胞和杂交白杨(*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.)树苗细胞壁层的平均微纤丝角,探究了 MFA 的径向变化及其对力学性能影响机制。低温透射电子显微镜(cryo-transmission electron microscope, cryo-TEM)是一种高级电子显微镜技术,可用于观察材料的纳米级结构,在观测过程中可以保持样品水分和结构的完整性,以保留其原始结构和化学组成。Reza 等<sup>[15]</sup>利用 cryo-TEM 对木材超薄切片进行观测,解析挪威云杉(*Picea abies*)木材细胞壁微纤丝角。使用电镜观察得到的数据精度高于 XRD 方法,更适用于解析木材纳米级原纤维和细胞壁结构,但需要制取的样品厚度更小。SilviScan 扫描仪是由 Evans 等<sup>[18]</sup>设计的一个结合了 X 射线吸收、光学显微镜以及高速 XRD 方法的扫描

表 2 木材纤维素晶体结构及微纤丝角参数分析方法

Tab. 2 Analysis method for crystal structure and microfibril angle parameters of wood cellulose

设备	测量参数类型	测试样品树种	样品制备方法	测试样品尺寸	引用
	纤维素结晶结构,包括纤维素结晶尺寸、纤维素微纤丝中纤维素分子的排列以及结晶纤维素的比例		将木结构建筑中花拱的样本磨成木粉进行测试	粉末	[11]
X射线衍射仪	纤维素晶体的晶格间距	柳杉( <i>Cryptomeria japonica</i> )、日本扁柏( <i>Chamaecyparis obtusa</i> )	将木材制成横截面和四等分锯切的样本,在密封的干燥室中用蒸馏水调节一个月,达到纤维饱和点,将样本分成3组进行不同的干湿处理周期	5 mm × 15 mm × 15 mm (横切样品) 5 mm × 18 mm × 15 mm (四等分锯切样品)	[13]
	纤维素微纤丝角	云杉( <i>Picea asperata</i> )	从树干上采集 10 mm 厚包括髓心的径向切片,后从每片树干的髓心至树皮处锯下包含晚材的纵向切片,每条再分成4片获得约 1 mm 厚的弦向切片	10 mm (R) × 10 mm (T) × 15 mm (L)	[14]
冷冻透射电子显微镜	纤维素微纤丝角	云杉( <i>Picea asperata</i> )	使用低温超微切片机制制样,将切片收集到碳涂层铜栅上,并在 1% 柠檬酸缓冲液用 1% KMnO <sub>4</sub> 染色 25 min	50 nm (厚度,梯形超薄切片)	[15]
广角 X 射线衍射仪	纤维素微纤丝角分布、结晶度和纤维素晶粒宽度	杨木( <i>Populus spp.</i> )	用手术刀从每根茎干的髓心和树皮中部切下相应测量尺寸的薄片样本	0.5 mm (R) × 0.5 mm (T) × 5 mm (L)	[16]
ITRAX-X射线显微密度计	生长环宽度、早材和晚材宽度及比例、环内平均木材密度、最小和最大木材密度、早材和晚材密度		测量可以在有完整钻孔的原木或矩形样本上进行		[17]
SilviScan 扫描仪	木材密度、纤维素微纤丝角	云杉( <i>Picea asperata</i> )	从木材髓部切得 20 mm 的径向切片,在丙酮中浸泡 12 h 后在 70 °C 下萃取 8 h。在 20 °C 和 40% 相对湿度的环境中调节含水量至 8%,后将样品锯成测量尺寸,表面用砂纸进行抛光	截面尺寸 2 mm (T) × 7 mm (R)	[18]

测量系统,用于快速、无损地测量木材密度、年轮宽度和微纤丝角,这些测试方法的结合为木材微观结构的表征提供了更全面的结构和化学性质信息。

木材纤维素晶体结构特征通常使用 XRD 技术进行分析。木材纤维素晶粒尺寸、分子排列方式、晶体结构的比例和晶格间距等参数决定了木材整体的吸湿性能。Guo 等<sup>[11]</sup>和 Toba 等<sup>[13]</sup>采用 XRD 技术,根据纤维素晶体结构揭示了木材细胞壁成分与吸湿性的变化规律。Svedström 等<sup>[16]</sup>使用广角 X 射线衍射(wide-angle X-ray scattering, WAXS)测量杂交白杨树苗的干燥变形、结晶度和纤维素微晶宽度,化学分析表明其组织内部有较强的张力,进而揭示了木材微观结构与机械性能的关系。X 射线照相及衍射分析也常与其他分析技术结合使用,形成多方法复合的分析测试系统,如将微光密度测量与 X 射线荧光(X-ray fluorescence, XRF)多元素分析相结合的设备——Itrax 微密度扫描仪<sup>[17]</sup>,该仪器可以在完整的钻芯上或从钻芯中制备的矩形样品上直接测量木材密度。Bergsten 等<sup>[19]</sup>首次使用 Itrax 微密度扫描仪分析测定了样本树木的年轮宽度、早材和晚材宽度及其比例、年轮内木材密度、每个生长环的最小和最大密度以及早材和晚材密度。

XRD 技术能够精确地分析木材中纤维素、木质素等大分子的晶体结构,确定其晶体形态、结晶度、结晶区的大小等信息,对木材纤维素的结晶性分析尤为有效,可以揭示木材中纤维素微纤丝的晶体排列及其在不同部位的变化,具有较快的扫描速度,且有一定的定量分析能力,缺点是 XRD 对样品的均匀性要求较高,木材样品如果存在较大的异质性或多孔结构,可能会导致衍射图谱复杂或不清晰,样品需要通过适当的切割、研磨等处理,其次 XRD 技术主要分析物质的结晶结构,对于木材中各类化学成分的定性定量分析不如 FTIR 或核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)等技术全面。

### 1.3 三维空间结构特征分析方法

木材三维空间结构的解析是木材微观分析中的重要环节,木材的内部结构包括细胞壁、导管、管胞、木纤维等三维解剖特征,可定量分析密度、孔隙率、含水率等物理参数,对研究木材的物理性能和结构特征至关重要,三维空间结构特征分析的木材样品制备方法、样品大小和观测参数<sup>[2, 20-37]</sup>如表 3 所示。通常使用 X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)技术进行解析,XCT 可将不同视角采集的多张射线照片,无损地重建其切片模型以获得 3D 视图。基本的成像原理是采用微焦点 X 射线球管对样品各个部位进行扫描投射,由

探测器和光电转换器将透过各层面的 X 射线转为数字信号,输入计算机从而成像,该技术通过设置不同分辨率等级,可在宏观到微米级别的尺度下成像。Fromm 等<sup>[20]</sup>使用 XCT 测得了云杉和橡树木质部的密度分布和含水率,通过图像减法计算密度差,得出整个云杉和橡树从下到上,从髓部到最外层的木质部水分变化规律及单个年轮早材和晚材的差异;Martin 等<sup>[21]</sup>使用 XCT 揭示了挪威云杉纵向和径向吸水过程中的水分迁移方式;Lehnebach 等<sup>[22]</sup>使用 Nanowood XCT 对欧洲黑松(*Pinus nigra*)、欧洲山毛榉(*Fagus longipetiolata*)和夏栎(*Quercus robur*)等样品进行扫描,分析了木质部生成过程中细胞壁密度变化规律,并估算了树木生长的相关参数。

此外,木材三维空间结构成像技术可准确表征木质复合材料中木材与高分子聚合物材料的结合状态。Feng 等<sup>[25]</sup>利用 NaI 水溶液作为木塑复合材料样品的造影剂,使用螺旋锥束 XCT 进行成像,通过相对于 X 射线源旋转和移动样品,对木质增强材料的几何形状进行数值分析。Li 等<sup>[21]</sup>使用高能 XCT 扫描仪动态监测压缩木质复合材料样品中木材和酚醛树脂胶黏剂的分布变化,更加准确地解释木材与高分子聚合物结合的微观结构状态,从而优化木质复合材料的制备方法,提升复合材料的性能。

另外,使用宏观尺度的三维扫描成像技术可对木材部分宏观结构特征进行分析,如 Bill 等<sup>[26]</sup>使用工业微焦点 XCT 扫描仪测定了年轮宽度;Huber 等<sup>[27]</sup>使用医学 XCT 扫描仪对 20 块挪威云杉板进行扫描,重构了木板的几何形状、髓心、节疤和局部纤维方向;刘晨君等<sup>[28]</sup>利用螺旋 XCT 扫描仪对马尾松(*Pinus massoniana*)原木进行检测,利用图像处理技术解译获取的原木缺陷 CT 图像,实现不同缺陷特征的三维可视化,将获得的缺陷类型、数量、尺寸、分布情况与实测情况进行了比较。

木材多尺度三维空间信息需要在不同的空间分辨率下进行成像整合,从微观到宏观尺度都能覆盖,且需要在同一样品上获取多尺度信息。X $\mu$ CT 是 XCT 技术的延伸和精细化,致力于实现更高分辨率与更精细的细节展示,其设备设计、数据处理等技术都源自传统 XCT,在硬件设计和算法优化上针对小样品和高分辨率进行改进,可更精准地获取木材组织的多尺度信息。Ebner 等<sup>[9]</sup>利用 X $\mu$ CT 技术对炭化木材内部微观结构进行了研究;Trtik 等<sup>[29]</sup>使用同步辐射相衬 X $\mu$ CT 得到云杉心材中尺寸小至 1.5 ~ 2.0  $\mu\text{m}$  的细胞解剖特征;Hu 等<sup>[30]</sup>使用 X $\mu$ CT 技术扫描测定了挪威云杉在无瑕疵木材、树枝木和过渡区中的管胞尺寸。以上研究表明 X $\mu$ CT 技术在较高空

表3 三维空间结构特征分析方法

Tab. 3 Analysis method for three-dimensional spatial structural features

设备	测试参数类型	测试样品树种	样品制备方法	测试样品大小	最佳分辨率	扫描时间	引用
X 射线 显微计算 断层扫描	压缩过程中木材试样内部结构的性能	花旗松( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	从树干切下 100 mm × 10 mm × 2.8 mm 的木块, 在 20 °C 和 65% 相对湿度下放置 4 周, 热压成双层板, 从板材上切割样本进行测试	4.0 mm × 4.0 mm × 5.0 mm	12 μm	25 min	[2]
	管胞尺寸、纤维方向	云杉( <i>Picea asperata</i> )	切割 4 组 150 mm × 150 mm × 500 mm 木材样本, 在窑炉中缓慢干燥至含水率约为 18% 后, 储存在 20 °C 和 65% 相对湿度的恒温室中, 样品每次切割和扫描后立即用塑料薄膜包裹	S1: 75 mm × 75 mm × 107 mm S2: 32 mm × 32 mm × 75 mm S3a, S3b: 9.5 mm × 9.5 mm × 75 mm S4a, S4b: 3.5 mm × 3.5 mm × 75 mm	52 μm 24 μm 7 μm 2.6 μm		[30]
	导管孔的数量、圆度、面积、周长	紫檀( <i>Pterocarpus indicus</i> )、阔叶黄檀( <i>Dalbergia latifolia</i> )		2 mm × 2 mm × 15 mm	1.95 μm		[36]
	导管直径、导管面积、导管密度和孔隙率	山毛榉( <i>Fagus longipetiolata</i> )、橡树( <i>Quercus palustris</i> )	将树茎切成约 30 mm 长的段, 软化后储存在甘油和乙醇的混合物中, 制样进行分析	5 mm × 5 mm × 25 mm	7 μm		[37]
	木质部三维剖面连接情况	金合欢( <i>Acacia aneura</i> )	用单面刀片从树枝上切下约 10 cm 的末端小枝	10 ~ 15 mm 分枝	3.4 μm		[31]
	真菌驱动的无机颗粒在定植木材中的分布	挪威云杉( <i>Picea abies</i> )、欧洲赤松( <i>Pinus sylvestris</i> )	将木质试验桩(5 mm × 10 mm × 100 mm)放置在土壤中进行生物降解, 放置不同的时长后移除并在 50 °C 下烘干, 以阻止真菌生长	2 mm × 2 mm × 15 mm	1 μm		[32]
	木质部含水率和横截面木材密度	云杉( <i>Picea abies</i> )、橡树( <i>Quercus robur</i> )	制取 5 cm 厚的树茎圆盘, 迅速放入干冰中冷冻, 然后将样本放入 103 °C 的烘箱中烘干, 脱水后再次进行扫描	5 cm(厚度)	0.122 5 mm	2 s(1 mm 厚度)	[20]
	木材中水分的时间演变和空间分布	挪威云杉( <i>Picea abies</i> )	从树干切得约有 73 个生长年轮的木盘, 沿木材的主要生长方向切割, 制备两组样本用于测试	A 组: 30.80 mm(L) × 8.70 mm(R) × 3.07 mm(T) B 组: 29.91 mm(R) × 8.90 mm(T) × 2.09 mm(L)	18 μm	10 s (每张图像)	[21]
	木质部形成过程中细胞壁密度的变化	黑松( <i>Pinus nigra</i> )、山毛榉( <i>Fagus sylvatica</i> )、夏栎( <i>Quercus robur</i> )	从树干中采集试样, 样品在乙醇中脱水后, 安装在圆柱形碳棒上进行扫描, 在 25 °C 和 40% 相对湿度下在扫描室中放置 12 h	2 mm 直径圆柱形微芯片	2.5 μm	700 ms (每张图像)	[22]
	木材干燥过程中的微观收缩	山毛榉( <i>Fagus sylvatica</i> )		2 mm × 2 mm × 2 mm	1.42 μm	< 5 min	[24]
	木塑的微观结构、木塑加固的几何形状		使用切割器和立式钻机从木塑样品中提取圆柱形心材后, 将样品密封在 PEEK 管中进行测试	5.8 mm(直径) × 9.68 mm(长度)	3.1 μm	16 h (2 880 次射线投影)	[25]
	纤维素纯化过程中的三维结构、管胞纤维、细胞壁厚度和纤维细胞	杉木( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	经过两步木质纤维素提纯的木材样本及其对照样本在 -40 °C 的冷冻干燥机中干燥 48 h 后, 立即密封进行测试	1 mm × 1 mm × 10 mm	0.3 μm	2 s (每个点)	[34]
	同步辐射 X 射线显微断层显微镜	木材的微观结构以及两种白腐真菌培养后密度分布的变化	挪威云杉( <i>Picea abies</i> )、欧亚槭( <i>Acer pseudoplatanus</i> )	制取尺寸为 100 mm(径向) × 2.5 mm(切向) × 200 mm(纵向)的样本, 用环氧乙烷灭菌后, 在不同条件下用真菌进行处理, 后切下约 1 mm <sup>3</sup> 的样本用于测试	1 mm × 1 mm × 1 mm	0.7 μm	130 ms (每张图像)
细胞壁厚度、管胞大小、具缘纹孔的大小和孔隙率		挪威云杉( <i>Picea abies</i> )	在心材中切边长为 8 mm 的立方体样本, 煮沸数小时后, 在早晚材之间的过渡区切下约 200 μm 厚的弦向切片, 后通过垂直夹持法获得另一个 200 μm 厚的径向切片	8 mm × 200 μm × 200 μm	0.7 μm	67 min (950 张轴切片图像)	[29]
阔叶材导管孔隙参数的显微图像		挪威云杉( <i>Picea abies</i> )	沿木材纤维方向切割得牙签状薄片样品, 使用氰基丙烯酸酯黏合剂将样品安装到样品架上, 在制样和测试过程中始终保持样品在相对湿度(33%)可控的恒温室中	500 μm × 500 μm × 8 mm	0.7 μm	4 min (1 024 张射线投影)	[23]
工业 CT 扫描仪	树环测量				5 μm		[26]
医用 CT 扫描仪	髓、节和局部纤维取向	云杉( <i>Picea abies</i> )	原木长度范围 3.4 ~ 5.6 m, 干燥至含水率 12%	50 mm × 100 mm × (3.4 ~ 5.6) m	0.68 mm	10 ms (每张图像)	[27]

间分辨率(通常在微米级别)成像的木材微观结构中,可适应多类型与多尺度样品。由于 X $\mu$ CT 技术可以对样品进行穿透性成像,生成高质量的三维重建模型,其对研究木材内部结构和空间排列非常有帮助。Page 等<sup>[31]</sup>、Koddenberg 等<sup>[32]</sup>、Gilani 等<sup>[33]</sup>使用 X $\mu$ CT 技术分别表征了金合欢(*Acacia aneura*)、云杉(*Picea asperata*)、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)、挪威云杉(*Picea abies*)和欧亚槭(*Acer pseudoplatanus*)等 8 个树种样品受到真菌降解前后的木质部三维微观结构。Shi 等<sup>[34]</sup>采用亚氯酸钠、冰醋酸和氢氧化钾在恒温水浴环境下对杨树和杉木早材的木质纤维素进行提纯,使用 X $\mu$ CT 对纯化过程中木材细胞的三维结构进行可视化分析和定量表征,检测了木质纤维素纯化过程中细胞结构的变化。以上研究体现了该方法在测试过程中的连续性和对试样的非破坏性。

三维空间结构特征分析技术同样也可以与其他微观分析方法结合。Mayo 等<sup>[35]</sup>使用 X $\mu$ CT 对具有不同解剖结构的木材样本进行扫描,该仪器可安装在 SEM 上,同时具有 X 射线显微镜和显微断层扫描功能,以揭示木材标本的细胞结构。木材三维空间结构的解析为木材的精准识别与分类提供了新方法。Yang 等<sup>[36]</sup>使用 Bruker kyScan1272 X $\mu$ CT 扫描仪测得了 6 种阔叶材的高分辨率显微图像,为木材树种的精准分类提供参考。Steppe 等<sup>[37]</sup>使用 SkyScan 1072 X $\mu$ CT 观测了幼年山毛榉(*Fagus longipetiolata*)和幼龄夏栎(*Quercus robur*)的干材样本,以探究导管解剖结构的差异,同时与使用光学显微镜观察获得的传统切片图像进行对比,观察表明 X $\mu$ CT 能够替代光学显微镜进行木材显微观察。

木材三维空间结构成像技术还可以在微观尺度上研究木材的动态膨胀收缩过程。Derome 等<sup>[23]</sup>采用同步辐射相衬 X $\mu$ CT,分析了挪威云杉在环境相对湿度控制下细胞尺度上的膨胀/收缩行为特征。鉴于木材对 X 射线的衰减能力较弱,并且需要使用低剂量的沉积电离辐射防止损伤,因此可采用相衬断层扫描方法。Taylor 等<sup>[24]</sup>利用 XCT 装置进行扫描,获得以时间为序列的图像,用以观察欧洲山毛榉木材的收缩行为;尽管与同步辐射相衬 X $\mu$ CT 相比,该技术的图像分辨率较低,测量时间较长,但其可在微观尺度上研究木材的动态变化过程。

XCT 技术在木材微观结构研究中应用广泛,可观察木材的内部结构,包括细胞壁、导管和管胞等微观解剖特征。通过不同分辨率设置,可在宏观到微米级别的尺度下成像,获取木材组织的多尺度信息。此外还可用于研究木材在湿度变化、真菌腐蚀和复杂应力下的结构变化,提供木材物理性能和动

态行为的变化规律。这些技术具有非破坏性,使其成为木材研究中的重要工具,缺点是 X $\mu$ CT 设备的实验成本相较于其他方法较高,且获取的三维图像数据需要经过复杂的处理和分析,尤其是经过大规模样本扫描时计算数据量较大,虽然 X $\mu$ CT 能提供木材的结构信息,但它主要关注的是物理结构和几何形态,无法像 X 射线衍射和光谱分析方法一样提供详细的化学成分信息。

#### 1.4 数据采集分析及 2D 与 3D 成像方法

使用各类木材微观分析方法采集的数据需要经过处理和校正才可获得用于描述形貌特征的图像。光学类分析技术输出的图像会不可避免地出现不同程度的伪影和噪点,科学合理地消除这些现象的影响尤为重要。以下介绍了木材微观分析方法及其在图像处理和数据校正中的应用。数据收集分析、成像方法及其对应的观测参数类型<sup>[23,25,29,32,34-42]</sup>如表 4 所示。

光学类分析得出的测试数据一般需通过数学处理或某些校正方法进行优化。例如,Trtik 等<sup>[29]</sup>使用加权反投影重建数据集,并通过背景函数校正和消除负值的方法来改进同步辐射相衬 X $\mu$ CT 的成像质量。另外,一些研究采用自主开发的软件来重建木材图像,如 Steppe 等<sup>[37]</sup>使用 SkyScan 软件可在图像中消除 X 射线衰减引起的环状伪影,Koddenberg 等<sup>[32]</sup>使用 datos|reconstruction 软件,进行反向滤波重建图像投影,可抑制断层扫描图像中的伪影,使输出图像更精准、清晰。另外通过对  $\mu$ CTanalysis<sup>[37]</sup>和 Avizo 软件<sup>[32]</sup>等图像分析软件的开发,可针对木材中特定的形貌特征进行分析和提取,加快木材导管特征测量分析的速度。

研究者还开发了多种算法和工具,如阈值分析、分水岭算法和形态学操作,用于图像分割和特征提取,以更精确地分析木材微观结构。阈值分析是一种标准图像分割方法<sup>[38]</sup>,如 Shi 等<sup>[34]</sup>通过 Dragonfly 软件使用阈值分析,将 X $\mu$ CT 设备输出图像中的孔隙和细胞壁划分为不同的部分,并利用分水岭算法和形态学操作从孔隙中划分出细胞裂纹和管腔。Brunel 等<sup>[39]</sup>将显微镜输出的图像减少噪点和增强对比度后,使用分水岭算法对测试木材的管胞、孔隙和木射线进行图像分割,更快地完成了细胞识别。Feng 等<sup>[25]</sup>使用 Drishti 软件对 NaI 浸渍前后的木塑复合材料样品断层扫描图像中的不同相位进行数值分析。Yang 等<sup>[36]</sup>利用形态学的方法获得了导管孔隙的二值图像,并读取了导管孔隙的数量、圆度、面积、周长等特征参数,准确率达到 98.9% 以上。Derome 等<sup>[23]</sup>观测挪威云杉在细胞尺度上的膨胀收

表4 数据收集分析及成像方法

Tab. 4 Data collection analysis and imaging methods

测试方法	数据收集、分析及成像方法	测量参数	引用
同步加速器显微断层成像	重建垂直于旋转轴的单切片图像; 使用滤波后投影, 并将所有负值设为零	管胞大小/形状、管壁厚度、孔隙率、纹孔	[29]
	开发了 $\mu$ CTanalysis 软件, 利用灰度图像阈值对二维图像进行更快、更简单的图像分割	导管内径、导管横截面积、导管密度和孔隙率	[37]
	使用 datos reconstruction® 软件将投影图像叠加转换成容积模型, 使用 Avizo 的区域生长工具对感兴趣的区域进行分割	真菌引起的早期木质部细胞变形和晚期木质部细胞厚壁中的孔洞	[32]
显微计算机断层扫描	利用各种形态学处理方法获得血管孔隙的二值图像, 并提取其特征进行分类	导管孔隙的数量、圆度、面积、周长和其他特征参数	[36]
	使用 Drishti 对NaI浸渍前后的木塑样品断层图中的相位进行可视化, 并根据体素强度创建了二维图像和三维动画	木质颗粒的体积、表面积和长宽比	[25]
	使用 Dragonfly 软件进行可视化和定量分析, 从图像中分割出细胞裂缝和孔隙	杉木和杨木纤维素提纯过程中三维结构的变化, 细胞壁厚度和腔体体积比	[34]
	LBP变形形成均匀LBP、旋转不变LBP和旋转不变均匀LBP, 并与 GLCM 特征融合, 形成3种融合特征	木材三切面显微图像	[41]
同步辐射相衬X射线断层显微镜	使用灰度阈值法将断层扫描图像分割成二进制的木材和空气体素数据集	测定木材膨胀/收缩应变	[23]
相位对比 X 射线成像	利用分析或迭代算法计算不同 X 射线吸收路径的衰减系数, 以重建图像	吸收对比度不够的样品内部结构	[40]
配备LCD相机的显微镜	细胞分割, 图像降噪, 将彩色图像转换为灰度图像, 分水岭算法	细胞厚度和尺寸	[39]
医用CT扫描仪	利用空间对齐CT图像的位移数据计算径向和切向收缩, 将 CT 图像导入 CAD 软件, 直接测量收缩率	径向和切向收缩	[42]

缩行为特征, 采用灰度阈值法, 将扫描图像分割成二进制的木材和空气体素数据集。Endrizzi 等<sup>[40]</sup>利用迭代算法计算不同 X 射线吸收路径的衰减系数, 以重建图像。此外, Yang 等<sup>[41]</sup>使用特征融合方法对结构相似的阔叶树进行分类和识别, 将 micro-CT 输出的木材三切面图像, 使用均匀局部二值模式和灰度共生矩阵的方法, 结合支持向量机和 BP 神经网络获得切面的最佳显微图像。Hansson 等<sup>[42]</sup>将医用 CT 扫描木材的图像文件导入计算机辅助设计 CAD 软件进行分析, 计算木材径向和弦向的收缩率。

以上研究成果表明, 通过使用数据收集分析、2D 和 3D 成像技术可以高效地提取木材的孔隙数量、形状、面积和体积变化等微观结构特征, 为理解木材的物理特性和力学性能提供重要数据支持。

目前, 微观结构的观测研究多局限在微米以上尺度, 对于纳米尺度和更小分子尺度结构的分析大部分基于理论模拟方法, 如根据分子动力学模型、混合法则、Mori-Tanaka 理论、Monte Carlo 理论、经典层合板理论、Halpin-Tsai 纤维增强理论、连续介质微观力学理论等, 分尺度构建木材细胞壁聚集体薄层、细胞壁单层, 以及细胞壁在拉、压、剪、弯力作用下弹塑性力学性能构效模型, 为研究微米和宏观尺度木材结构及性能构效关系提供支撑。

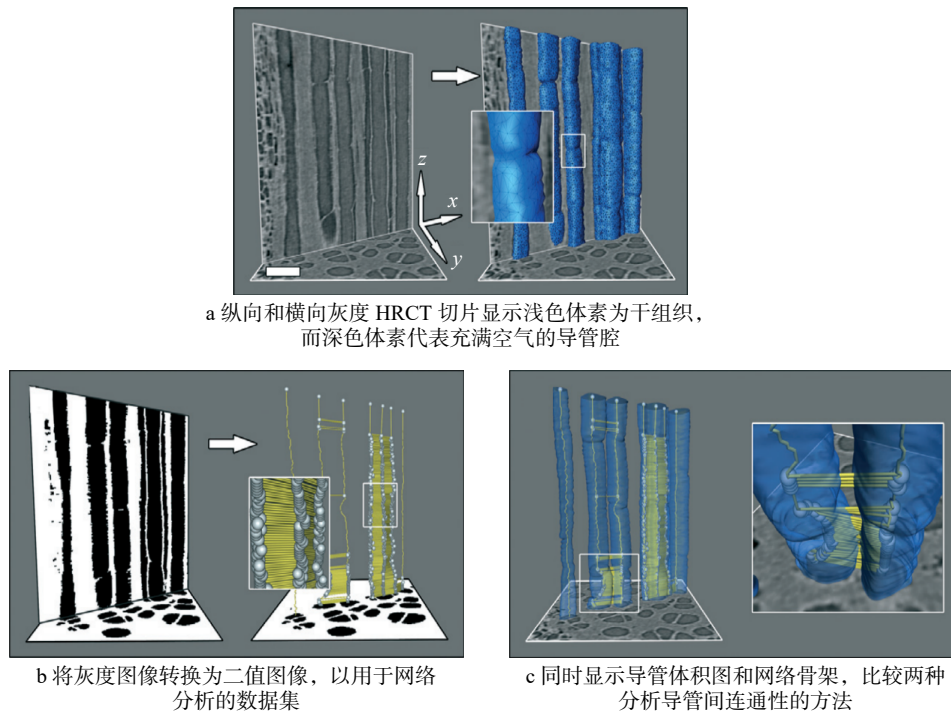
## 2 木材微观结构特征参数

木材的微观结构特征, 如管胞尺寸、细胞壁厚度、总孔隙率以及某些细胞和特殊组织的孔隙率, 都会影响木材的宏观特性。开发多种微观结构分析方法的目的是可视化木材的微观结构细节, 并量化分析微观结构对物理力学性能的影响。

### 2.1 形貌特征与细胞结构特征参数

木材的一些重要形貌结构(如木射线、导管、管胞和薄壁组织)的尺寸通常在亚微米级别, 使用一些更小分辨率级别的观测分析方法能够观察和量化木材微观结构中较小的细节和特征。木材形貌结构细节包括导管和射线轨迹变化, 细胞壁密度的变化和早材到晚材过渡区域的细胞壁密度变化与差异等。

微观结构分析技术可应用于分析改性处理木材的微观结构变化, 从微观结构上看, 早材细胞壁薄, 细胞腔体大, 在破坏变形中更易于回弹恢复, 这是由于破坏变形主要发生在细胞壁内壁上的基质中<sup>[3]</sup>。另外, 在需要进行后续分析或保存样品完整性的研究中, 要求测试方法要在不破坏样品的情况下尽可能重建样品的原始结构和形貌特征, 如持续监测木材在处理过程中微观尺度上的收缩变化和木质部的生长情况等。图 2 为基于 X 射线计算机断层扫描图

图 2 木材组织的虚拟切片、生成体积渲染解剖图<sup>[43]</sup>Fig. 2 Virtual slices of wood tissue, generating volume-rendered anatomical images<sup>[43]</sup>

像构成的木材组织虚拟解剖图，该图清晰地展示组织中导管的分布和连通方式<sup>[43]</sup>。

通过微观结构分析技术可以对木材细胞结构形态进行定量分析，测量得出的参数主要包含细胞壁厚度、细胞直径、导管/管胞的特征参数、孔隙率等关键指标(表 5)，这些数据有助于研究木材特性，比较不同材种的差异性。

管胞是针叶材木质部中最主要的细胞，各类微观分析方法主要围绕细胞壁厚、管胞形态参数、孔隙率等数值的分析。综合表 5 相关研究表明，大多数管胞为四边形，部分为五边形和六边形。细胞壁厚度、细胞和管腔直径等数值集遵循着正态分布，比较同一株树中不同部位木质部的微观结构差异，结果表明早晚材的纤维结构没有变化，而纤维方向在生长轮中不断变化。导管是阔叶材木质部中最主要的细胞之一，各类微观分析方法主要围绕细胞壁厚、导管形态参数、导管密度等数值进行分析。

木材微观尺度层面也有一些以往传统切片观察忽略的特殊微观结构，如各类纹孔和薄壁组织细胞等。Trtik 等<sup>[29]</sup> 使用同步辐射 X $\mu$ CT 同时得到挪威云杉纵向管胞径向壁上的具缘纹孔和径向横截面中的射线薄壁细胞图像，其中充满了 10~20  $\mu$ m 且折射率明显高于细胞壁本身的物体，这些很可能是植物细胞中经常发现的结晶内含物，表明此研究使用的样品制备和 XCT 技术是非破坏性的，样本结构和原始成分是完整的。轴向薄壁组织细胞在径切面和

弦切面上轴向薄壁组织细胞与细长的纤维形成鲜明对比，它们的长度比纤维短得多，但直径比纤维大，大多数轴向薄壁细胞的形状为矩形。

## 2.2 细胞壁微纤丝

木材细胞壁  $S_2$  层中的微纤丝是影响木材机械性能的主要因素之一，通过测量木材细胞壁微纤丝的结构参数，有助于高效预测木材的性能，以在生产加工中更大限度地利用木材。Reza 等<sup>[15]</sup> 使用 SEM 对云杉管胞壁中微纤丝的物理组织结构进行成像，测量得到微纤丝的平均宽度为 3.5 nm，观测结果表明微纤丝的组织结构在细胞壁层与层之间以及在细胞壁单个层内均不相同。Svedström 等<sup>[16]</sup> 测得温室栽培的杂交杨树样品的平均微纤丝角为 8°~14°，明显低于欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 和挪威云杉 (*Picea abies*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 幼树和杨树 (*Populus* spp.) 幼树，这表明温室栽培的杂交杨树苗中可能含有应力木。Yin 等<sup>[14]</sup> 研究杉木中微纤丝角的径向变化及其对力学性能的影响，使用 XRD 的方法测试并计算出杉木管胞细胞壁  $S_2$  层的 MFA，按照距髓心的生长轮数排列，MFA 从髓心到边材的变化范围为 8.5°~20.1°，且幼龄木材的 MFA 变化大于成熟木材；通过制取不同 MFA 的杉木试样并进行力学性能测试，得到了木材的纵向弹性模量、静态弯曲强度和顺纹压缩应力等力学性能参数均随 MFA 的降低呈对数增加的数据曲线，表明了微纤丝角的增大会降低木材的部分力学性能。

表5 木材细胞壁厚度、细胞直径、导管/管胞参数、孔隙率  
Tab. 5 Wood cell wall thickness, cell diameter, vessel/tracheid parameters and porosity

树种	测试技术	细胞壁厚度/ $\mu\text{m}$	细胞直径/ $\mu\text{m}$	导管/管胞参数	孔隙率/%	引用
花旗松 ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	配备紫外光源的光学显微镜	$2.4 \pm 0.6$ (早材双层厚度)	$38.9 \pm 11$ (早材弦向)		$72 \pm 2$ (早材)	[2]
	原型 X 射线超显微镜	$8.5 \pm 2.1$ (晚材双层厚度)	$7.8 \pm 4.1$ (晚材弦向)		$21 \pm 2$ (晚材)	[35]
杂交白杨( <i>Populus tremula</i> L. $\times$ <i>Populus tremuloides</i> Michx.)	X射线断层扫描、X射线衍射	$2.9 \pm 0.2$ (双层厚度)	$10.5 \pm 0.5$			[16]
云杉 ( <i>Picea asperata</i> )	X射线显微计算机断层扫描	$3.16 \pm 0.70$ (无纹孔径向)	$35.0 \pm 6.4$ (径向)		$59.8 \pm 2.5$	[29]
		$1.56 \pm 0.40$ (有纹孔径向)				
挪威云杉 ( <i>Picea abies</i> )	X射线显微计算机断层扫描	$2.99 \pm 0.58$ (弦向)	$35.3 \pm 5.9$ (弦向)			
			20 ~ 50 (无瑕疵木材径向管腔)	1.2 mm (无瑕疵木材管胞长度)		
			15 ~ 35 (无瑕疵木材弦向管腔)			
			5 ~ 25 (分枝木径向管腔) 5 ~ 20 (分枝木弦向管腔)	0.5 mm (分枝木管胞长度)		[30]
		10 ~ 30 (过渡区管腔)				
		50(早材管腔)			$76$ (早材) $27$ (晚材)	[33]
欧洲山毛榉 ( <i>Fagus sylvatica</i> )	X射线显微计算机断层扫描		$33 \pm 9$	$(0.89 \pm 0.47) \times 10^3 \mu\text{m}^2$ (导管表面积), $(108 \pm 15)$ 个/ $\text{mm}^2$ (导管数密度)	$9.7 \pm 1.7$	[37]
夏栎 ( <i>Quercus robur</i> )	X射线显微计算机断层扫描		$34 \pm 23$	$(56 \pm 5)$ 个/ $\text{mm}^2$ (导管数密度) $(1.24 \pm 1.57) \times 10^3 \mu\text{m}^2$ (导管表面积)	$7.2 \pm 0.7$	
火炬松 ( <i>Pinus taeda</i> )	X射线显微计算机断层扫描				$39 \pm 1$ (早材) $64 \pm 1$ (晚材)	[35]
<i>Acacia aneura</i> , <i>Acacia ayersiana</i>	X射线显微计算机断层扫描			$238 \text{ mm}^2$ (导管表面积) $822$ 个/ $\text{mm}^2$ ( <i>Acacia ayersiana</i> 导管数密度) $637$ 个/ $\text{mm}^2$ ( <i>Acacia aneura</i> 导管数密度)		[31]
欧亚槭( <i>Acer pseudoplatanus</i> )	X射线显微计算机断层扫描		10 ~ 25(纵向管腔)		51(早材)	[33]
白杨( <i>Populus</i> sp.)	X射线显微计算机断层扫描	2.52				[34]
杉木( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	X射线显微计算机断层扫描	2.55				
欧洲白蜡 ( <i>Fraxinus excelsior</i> )	X射线显微计算机断层扫描		210(早材)	$9\ 967\ 086 \mu\text{m}^3$ (早材导管管腔)		[44]
			63(晚材)	$850\ 927 \mu\text{m}^3$ (晚材导管管腔)		

### 2.3 密度与水分含量

木材中的水分含量及变化、密度等测量参数也是决定木材理化性质的重要参数,应用的领域可以从基础研究延伸到实际应用。Martin等<sup>[21]</sup>利用XCT研究挪威云杉在纵向和径向上水分迁移速度空间分布,研究发现在纵向吸水过程中,晚材中水分迁移速

度比早材快,因为晚材中没有吸气孔,更有利于液体迁移,早材中的水分迁移较为复杂,水分在相连管腔中迁移最快。He等<sup>[45]</sup>采用XCT对落叶松(*Larix gmelinii*)的心边材进行扫描,并建立起心边材的含水率和密度与XCT值的对应关系公式。Sedighi等<sup>[33]</sup>使用同步辐射X $\mu$ CT测得挪威云杉晚材的密度为

865 kg/m<sup>3</sup>, 高于早材的 265 kg/m<sup>3</sup> 和欧亚槭 (*Acer pseudoplatanus*) 的 562 kg/m<sup>3</sup>, 虽然早材生长层的密度低于晚材, 但当木材生长时间较长时, 它们的密度差异会减小, 此性质可用于改性木材, 以实现更均匀的吸附和机械相互作用。通过分析木材密度对水分渗透性的影响, 有助于改进多孔木材作为结构材料的数值预测模型, 以提高材料性能和耐久性。

### 3 总结语

木材微观结构的分析对于认识木材性质和应用具有重要意义。光学显微镜是一种常用的工具, 适合进行大范围、简单操作的观察, 并能快速制作样品。电子显微镜则以其极高的分辨率揭示木材的细节和微观特征, 特别适用于需要详细观察处理过程前后木材样品的情况, 对样品制备的要求较为灵活。原子力显微镜则能够在纳米级别上观察材料表面的三维形貌特征, 同时不会损伤样品。光谱学技术可以提供关于木材分子和化学键结构的详细信息, 可与显微成像方法结合使用, X 射线衍射技术则能揭示木材中晶体结构的细节。X 射线计算机断层扫描无损地重建木材的 2D 和 3D 视图, 从微观到宏观尺度都能覆盖, 可以替代光学观察进行木材显微结构分析, 为木材的精准识别提供了新的方法, 且能够可视化木材内部结构, 分析木材受到真菌腐蚀降解的影响, 定量分析木材的物理力学性能等。针对各种微观分析方法, 还开发了多种数据收集和分析技术, 以消除输出图像的伪影和噪点, 提取关键特征信息。

木材的微观结构特征包括形貌、细胞壁厚度、内部导管或管胞的形态参数、孔隙率, 以及纤维素微纤丝等, 对这些结构特征的观测和分析不仅可以详细描述不同木材种类在显微结构上的差异, 还可以为理解木材的物理和力学性质提供重要参考, 展示木材在工程和科学应用中的潜力。目前, 木材的结构观察研究主要集中在微米尺度上, 能够直接观察和表征的方法已相对成熟。然而, 对于木材纳米尺度及更小分子尺度的结构分析, 现有的直接观察方法仍然面临挑战, 在这些尺度下, 研究者们主要依赖于理论模型和计算方法来揭示结构与性质的构效关系。因此, 开发在纳米和更小尺度进行直接观察表征的新技术, 是当前研究中的一个重要课题。这些技术进步将为我们提供对木材更深入的了解, 并推动纳米材料与分子结构研究领域的发展。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen C, Kuang Y, Zhu S, et al. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 642–666.

- [2] Li W, Zhang Z, Mei C, et al. Understanding the mechanical strength and dynamic structural changes of wood-based products using X-ray computed tomography[J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, 18(2): 454–463.
- [3] Wang J, Yang K, Li W, et al. The impact of earlywood and latewood on the compressive stress of thermally modified Douglas fir[J]. *Forests*, 2023, 14(7): 1376.
- [4] 方旋, 张景朋, 熊怡心, et al. 自然老化杉木梁的分区可处理性[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(11): 124–132.
- Fang X, Zhang J P, Xiong Y X, et al. Sub-regional treatability of a naturally aging Chinese fir beam[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(11): 124–132.
- [5] 王瑜瑶, 马尔妮. 不同预处理方法对木材细胞壁孔隙结构影响[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(11): 140–151.
- Wang Y Y, Ma E N. Effects of different pretreatment methods on the pore structure of wood cell wall[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(11): 140–151.
- [6] Liu M, Wang J, Xu G, et al. Efficacy of linseed oil-treated wood to improve hydrophobicity, dimensional stability, and thermostability[J]. *Wood Research*, 2021, 66(5): 777–788.
- [7] Conceição W S D, Matos R S, Melo I D C, et al. Measurement of wood surface roughness in *Dinizia excelsa* Ducke using an atomic force microscope[J]. *Acta Scientiarum Technology*, 2022, 44: e56509.
- [8] Mao J, Abushammala H, Kasal B. Monitoring the surface aging of wood through its pits using atomic force microscopy with functionalized tips[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 609: 125871.
- [9] Ebner D H, Tortora M, Bedolla D E, et al. Comparative investigation of chemical and structural properties of charred fir wood samples by Raman and FTIR spectroscopy as well as X-ray-micro-CT technology[J]. *Holzforschung*, 2023, 77(9): 734–742.
- [10] Kanbayashi T, Ishikawa A, Matsunaga M, et al. Application of confocal raman microscopy for the analysis of the distribution of wood preservative coatings[J]. *Coatings*, 2019, 9(10): 621.
- [11] Guo J, Zhou H, Stevanic J S, et al. Effects of ageing on the cell wall and its hygroscopicity of wood in ancient timber construction[J]. *Wood Science and Technology*, 2017, 52(1): 131–147.
- [12] Mallik A, Tarrío-Saavedra J, Francisco-Fernández M, et al. Classification of wood micrographs by image segmentation[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2011, 107(2): 351–362.
- [13] Toba K, Yamamoto H, Yoshida M. Mechanical interaction between cellulose microfibrils and matrix substances in wood cell walls induced by repeated wet-and-dry treatment[J]. *Cellulose*, 2012, 19(4): 1405–1412.
- [14] Yin Y, Bian M, Song K, et al. Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) [J]. *IAWA Journal*, 2011, 32(4): 431–442.
- [15] Reza M, Ruokolainen J, Vuorinen T. Out-of-plane orientation of cellulose elementary fibrils on spruce tracheid wall based on imaging with high-resolution transmission electron microscopy[J]. *Planta*, 2014, 240(3): 565–573.

- [16] Svedström K, Lucenius J, van den Bulcke J, et al. Hierarchical structure of juvenile hybrid aspen xylem revealed using X-ray scattering and microtomography[J]. *Trees*, 2012, 26(6): 1793–1804.
- [17] Kilpeläinen A, Peltola H, Ryyppö A, et al. Wood properties of Scots pines (*Pinus sylvestris*) grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(13): 889–897.
- [18] Evans R, White R M. Art, science and informatics: visualisation of large, complex data sets in high-speed measurement of the microstructure of wood[R]. Melbourne, Australia: CSIRO Forestry and Forest Products, 2002.
- [19] Bergsten U, Lindeberg J, Rindby A, et al. Batch measurements of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensitometry[J]. *Wood Science and Technology*, 2001, 35(5): 435–452.
- [20] Fromm J R H, Sautter I, Matthies D, et al. Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(2): 416–425.
- [21] Martin B, Colin J, Lu P, et al. Monitoring imbibition dynamics at tissue level in Norway spruce using X-ray imaging[J]. *Holzforschung*, 2021, 75(12): 1081–1096.
- [22] Lehnebach R, Campioli M, Gričar J, et al. High-resolution X-Ray computed tomography: a new workflow for the analysis of xylogenesis and intra-seasonal wood biomass production[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 698640.
- [23] Derome D, Griffa M, Koebel M, et al. Hysteretic swelling of wood at cellular scale probed by phase-contrast X-ray tomography[J]. *Journal of Structural Biology*, 2011, 173(1): 180–190.
- [24] Taylor A, Plank B, Standfest G, et al. Beech wood shrinkage observed at the micro-scale by a time series of X-ray computed tomographs ( $\mu$ XCT)[J]. *Holzforschung*, 2013, 67(2): 201–205.
- [25] Feng D, Turner M, Evans P D. Sodium iodide as a contrast agent for X-ray micro-CT of a wood plastic composite[J]. *Applied Sciences*, 2021, 12(1): 208.
- [26] Bill J, Daly A, Johnsen Ø, et al. DendroCT: dendrochronology without damage[J]. *Dendrochronologia*, 2012, 30(3): 223–230.
- [27] Huber J A J, Broman O, Ekevad M, et al. A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans[J]. *Computers & Structures*, 2022, 260: 106702.
- [28] 刘晨君, 杨淑敏, 薛紫莽, 等. 计算机断层扫描马尾松缺陷及其图像解译[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(10): 144–152.  
Liu C J, Yang S M, Xue Z Q, et al. Computerized tomography of defects in *Pinus massoniana* and its image interpretation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(10): 144–152.
- [29] Trtik P, Dual J, Keunecke D, et al. 3D imaging of microstructure of spruce wood[J]. *Journal of Structural Biology*, 2007, 159(1): 46–55.
- [30] Hu M, Olsson A, Hall S, et al. Fibre directions at a branch-stem junction in Norway spruce: a microscale investigation using X-ray computed tomography[J]. *Wood Science and Technology*, 2022, 56(1): 147–169.
- [31] Page G F, Liu J, Grierson P F. Three-dimensional xylem networks and phyllode properties of co-occurring *Acacia*[J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34(12): 2149–2158.
- [32] Koddenberg T, Zauner M, Militz H. Three-dimensional exploration of soft-rot decayed conifer and angiosperm wood by X-Ray micro-computed tomography[J]. *Micron*, 2020, 134: 102875.
- [33] Sedighi G M, Boone M N, Mader K, et al. Synchrotron X-ray micro-tomography imaging and analysis of wood degraded by *Physisporinus vitreus* and *Xylaria longipes*[J]. *Journal of Structural Biology*, 2014, 187(2): 149–157.
- [34] Shi J, Liu X, Xia C, et al. Visualization of wood cell structure during cellulose purification via high resolution X-ray CT and spectroscopy[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 189: 115869.
- [35] Mayo S C, Chen F, Evans R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography[J]. *Journal of Structural Biology*, 2010, 171(2): 182–188.
- [36] Yang X, Zhao Z, Wang Z, et al. Microstructure identification based on vessel pores feature extraction of high-value hardwood species[J]. *BioResources*, 2021, 16(3): 5329.
- [37] Steppe K, Cnudde V, Girard C, et al. Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics[J]. *Journal of Structural Biology*, 2004, 148(1): 11–21.
- [38] Florisson S, Gamstedt E K. An overview of lab-based micro computed tomography aided finite element modelling of wood and its current bottlenecks[J]. *Holzforschung*, 2023, 77(11–12): 793–815.
- [39] Brunel G, Borianne P, Subsol G, et al. Automatic identification and characterization of radial files in light microscopy images of wood[J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(4): 829–840.
- [40] Endrizzi M. X-ray phase-contrast imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 878: 88–98.
- [41] Yang X, Jiang H, Ma L, et al. Micro image classification of 19 high-value hardwood species based on texture feature fusion[J]. *BioResources*, 2023, 18(2): 3373–3386.
- [42] Hansson L, Couceiro J, Fjellner B A. Estimation of shrinkage coefficients in radial and tangential directions from CT images[J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2016, 12(4): 251–256.
- [43] Brodersen C R, Lee E F, Choat B, et al. Automated analysis of three-dimensional xylem networks using high-resolution computed tomography[J]. *New Phytologist*, 2011, 191(4): 1168–1179.
- [44] Koddenberg T, Militz H. Morphological imaging and quantification of axial xylem tissue in *Fraxinus excelsior* L. through X-ray micro-computed tomography[J]. *Micron*, 2018, 111: 28–35.
- [45] He X, Qi D. Density and moisture content forecasting based on X-ray computed tomography[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, 71(5): 647–652.