

基于 X-CT 技术的木材三维孔隙结构评定与量化研究

耿汇泉, 金琿, 周新甲, 鲁佳彬, 李晓龙, 赵景尧*

(生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040)

摘要:木材的微观孔隙结构是影响其宏观水分迁移、传热及力学性质等重要因素。为定量表征孔隙结构对上述参数的影响,首要任务是获得精确的孔隙结构参数信息。然而传统孔隙结构检测方法在三维孔隙结构评定与参数精确量化分析方面略显不足。为此本文采用 X 射线计算机断层扫描(简称 X-CT)技术重构木材三维孔隙结构,结合数字图像处理技术量化孔隙结构参数,以期为木材三维孔隙结构检测与量化分析提供新途径。以落叶松与柞木为研究对象,对其进行 X-CT 检测,将扫描结果(多层二维平面图像)在 Avizo 软件中进行三维体渲染(三维立体图像);在此基础上,采用图像裁切、噪声过滤、阈值分割及标记等数字图像处理手段,识别三维孔隙结构特征;定量计算诸如孔隙率(体/面)、孔面积与孔体积、孔径分布及连通性。结果表明,边长 3 mm 的立方体松木样品内,孔径尺寸范围为 9.65~79.51 μm ,平均孔径为 26.03 μm ,孔体积为 $1.58 \times 10^{10} \mu\text{m}^3$,孔面积为 $1.65 \times 10^9 \mu\text{m}^2$,体孔隙率为 58.46%,面孔隙率范围为 56.61%~59.64%;轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别为 78.5%与 80.3%。同样尺寸的柞木样品内,孔径尺寸范围为 11.01~319.68 μm ,平均孔径为 51.24 μm ,孔体积为 $1.01 \times 10^{10} \mu\text{m}^3$,孔面积为 $1.12 \times 10^9 \mu\text{m}^2$,体孔隙率为 37.57%,面孔隙率范围为 36.05%~39.07%;轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别为 74.4%与 67.3%。本研究基于 X-CT 技术定性定量表征了木材孔隙结构,可为木材孔隙结构重构及导热、渗流及扩散模拟提供孔隙结构数据支撑,同时为木材微观孔隙的研究提供了新思路。

关键词:孔隙结构;孔径分布;连通性;X-CT;图像处理

中图分类号: S781.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8023(2021)05-0043-07

DOI:10.16270/j.cnki.slgc.2021.05.011

Evaluation and Quantification of Wood 3D Pore Structure via X-CT Technology

GENG Huiquan, JIN Hun, ZHOU Xinjia, LU Jiabin, LI Xiaolong, ZHAO Jingyao*

(Key Laboratory of Bio-based Materials Science and Technology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The micro pore structure of wood is an important factor affecting its macro water migration, heat transfer and mechanical properties. In order to quantitatively characterize the influence of pore structure on the above physical parameters, the first task is to obtain accurate pore structure parameter information. However, traditional pore structure detection methods are slightly inadequate in terms of three-dimensional pore structure evaluation and accurate quantitative analysis of parameters. In this paper, X-CT (X-ray computed tomography) technology was used to reconstruct the three-dimensional pore structure of wood, and on this basis, the pore structure parameters were quantified with digital image processing technology, in order to provide a new way for the detection and quantitative analysis of three-dimensional pore structure of wood. This study took larch and oak as the research objects, carried out X-CT detection on them, and performed 3D volume rendering (3D stereo images) on the scan results (two-dimensional multi-layered graphics) in Avizo software. On this basis, digital image processing methods such as image cutting, noise filtering, threshold segmentation and marker were used to identify the 3D pore structure characteristics. Porosity (volume/surface), pore area and pore volume, pore size distribution and connectivity were quantitative calculated. The results showed that in the 3mm cubic pine sample, the pore size range was 9.65-79.51 μm , the average pore size was 26.03 μm , the pore volume was $1.58 \times 10^{10} \mu\text{m}^3$, the pore area was $1.65 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, the volume porosity was 58.46%, and the surface porosity range was 56.61%-59.64%. The area and volume ratios of axial interconnected pore were about 78.5% and 80.3%. In the same size oak samples, the pore size range was 11.01-319.68 μm , the average pore size was 51.24 μm , the pore volume was $1.01 \times 10^{10} \mu\text{m}^3$, the pore area was $1.12 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, the volume porosity was 37.57%, the surface porosity range was 36.05%-39.07%. The area and volume ratios of axial interconnected pore were about 74.4% and 67.3%. This study qualitatively and quantitatively characterized the wood pore structure based on X-CT technology, which can provide data support for the reconstruction of pore structure of wood and the simulation of thermal conductivity, seepage and diffusion, and provide a new idea for the study of microscopic pores of wood.

Keywords: Pore structure; pore size distribution; connectivity; X-CT; image processing

收稿日期: 2021-04-17

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(31901242); 黑龙江省自然科学基金(LH2020C038); 东北林业大学大学生创新训练计划项目资助(202010225110)

* 通信作者: 赵景尧, 博士, 讲师。研究方向为木材物理及干燥模拟仿真。E-mail: Zjy_29445629@qq.com

引文格式: 耿汇泉, 金琿, 周新甲, 等. 基于 X-CT 技术的木材三维孔隙结构评定与量化研究[J]. 森林工程, 2021, 37(4): 43-49.

GENG H Q, JIN H, ZHOU X J, et al. Evaluation and quantification of wood 3D pore structure via X-CT technology [J]. Forest Engineering, 2021, 37(4): 43-49.

0 引言

木材是一种具有典型多尺度分级结构的多孔材料,其内部构造主要是由木材基质(纤维素、半纤维素、木质素)与孔隙构成。木材内部孔隙结构的复杂性,是导致其材性具有较大变异性的主要原因,同时,复杂的微观孔隙结构亦是影响宏观导热、导电、水分迁移及力学等参数的重要因素。因此,关于木材孔隙结构特征的研究,一直被认为是国际木材科学领域研究的重点。

目前,木材孔隙结构特征的表征手段主要有:显微分析法(光学显微镜、扫描及透射电镜等)、气体吸附法、压汞法及核磁共振法^[1]。其中,显微分析法是识别木材二维孔隙结构特征的通用方法,该方式可直接获得木材局部信息,但定量分析能力较差,仅能获得切片表面信息,不可获得木材体孔隙率与孔隙连通性等信息。近期相关研究有 Yin 等^[2]、何盛等^[3]和 Rajagopal 等^[4]。

气体吸附法与压汞法均属于间接测量方式,即利用气体(CO₂或N₂)在毛细管中显现的毛细凝聚现象或液体(Hg)与木材基质不润湿特性,通过检测成分进入木材内部总量,间接获得木材孔隙结构信息。该方式的特点是:可获得木材整体孔隙结构信息,如孔隙率、孔体积、孔面积及孔径分布;但针对木材某一局部信息的表征能力较弱。同时,BET 计算模型、连通圆柱型孔隙的假设必然导致检测结果误差。相关研究有 Plötze 等^[5]、裴姗姗等^[6]、Zauer 等^[7]和 Li 等^[8]。

核磁共振法也是一种间接测量方式,利用木材内部水分的¹H核的横向弛豫时间与孔隙半径成正比这一基本原理,进而根据孔径与核磁动力学参数的关系计算木材孔径分布。然而,该方法仍然未能获得三维直观孔隙结构,且孔径与核磁动力学参数的精确对应关系不易获得^[9]。

X射线计算机断层扫描技术(简称X-CT),是一种检测材料内部结构特征并获得量化数据的有效手段。在岩石、土壤、食品、纺织及医学等领域得到广泛应用^[10]。其基本原理为:将X射线从不同的方向对样品进行扫描,根据不同物质对射线的吸收程度不同,获得衰减系数值的二维分布(衰减系数矩阵);再按CT值的定义,把各个体素的衰减系数值转换为对应像素的CT值,得到CT值的二维分布(CT值矩阵)。最终,将图像面上各像素的CT值转

换为灰度,就得到图像面上的灰度分布,此灰度分布就是CT影像。然而,在木材科学领域中,目前仅局限在密度、含水率及缺陷检测方面^[11-13],对于木材孔隙结构的3D重构及参数量化的研究甚少,尤其是孔隙结构连通性的检测(上述方法不可检测),更未见报道。众所周知,木材内部孔隙的连通性对水分迁移起到重要作用,影响木材加工过程中的干燥、改性及胶结过程。

鉴于此,本研究以落叶松与柞木为对象,对其进行X-CT检测,重构三维孔隙结构(定性分析),结合数字图像处理技术,计算诸如孔隙率(面、体)、孔面积、孔体积、孔径分布及连通性(定量分析)。可为木材孔隙结构重构及导热、渗流及扩散模拟提供孔隙结构数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料准备

本研究选用阔叶材与针叶材中具有代表性的树种木材,为采自大兴安岭林区的落叶松(*Larix gmelinii*)与柞木(*Xylosma racemosum*)。用于X-CT检测的样品落叶松和柞木均加工成边长约3mm的立方体小块;从2个树种中各选1块代表性试样,为保证精度,同一试样扫描2次。样品各表面采用1000#砂纸(颗粒大小约为25.4μm)进行砂光,检测之前将样品进行绝干处理。

1.2 X-CT设备

实验设备X-CT型号为nano Voxel 3000(天津三英精密仪器股份有限公司),主要技术参数:最大扫描电压及电流分别为100kV与200μA,平板探测器尺寸250mm×200mm,分辨率小于5μm,探测器物理像素单元数量大于等于4800×3200个,最大单张二维重构切片小于等于12000×12000个像素,成像模式为旋转扫描模式,每张图像曝光时间约1500ms,完成一次扫描耗时约90min。计算机为Dell工作站,型号Precision 7530。X-CT设备及样品扫描如图1所示。

1.3 CT扫描图像数据处理及重建

经X-CT扫描所获得的图像数据必须经过数字化处理才能进行图像识别与量化分析。通常此处理过程如下。

(1)二维图像重建:即将扫描结果(衰减系数分布)通过图像重建算法来重构探测平面的二维图像,如图2和图3所示。

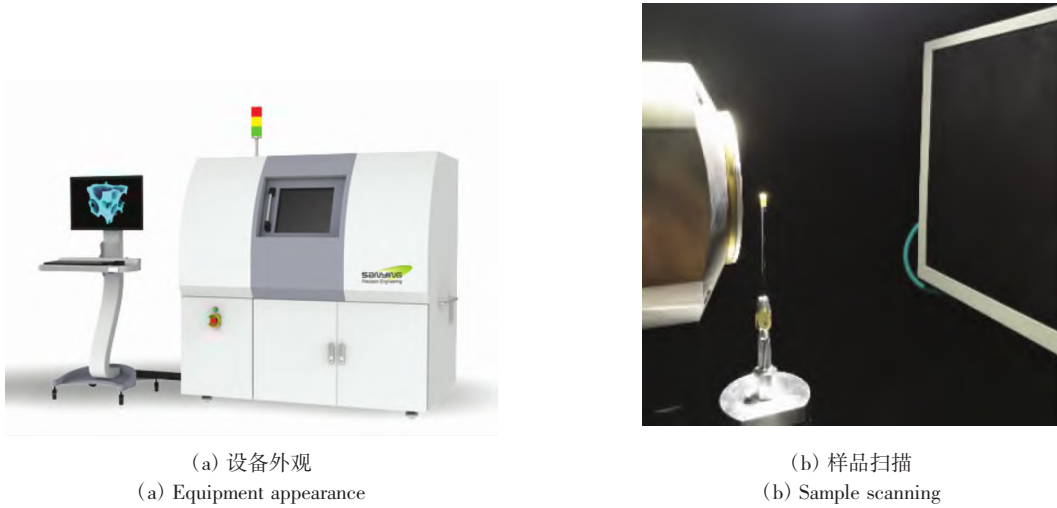


图 1 X-CT 设备
Fig.1 X-CT equipment

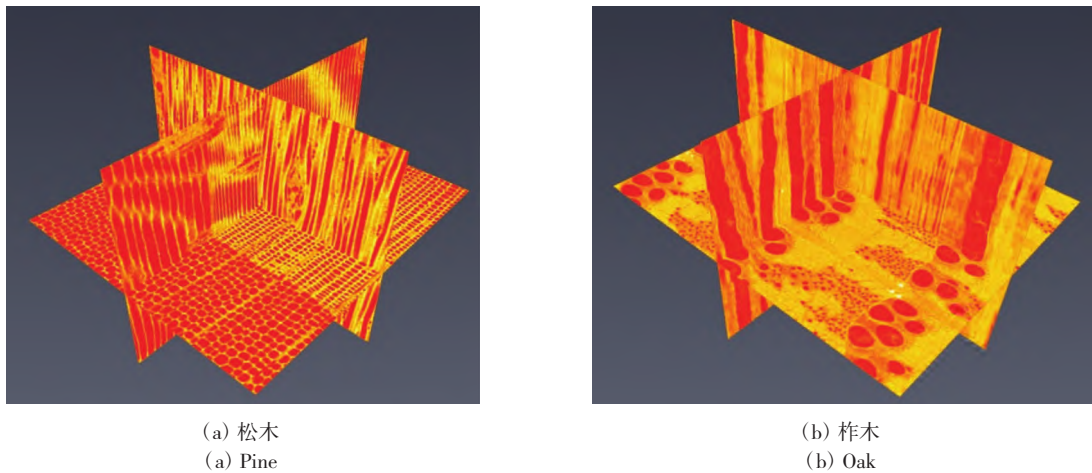


图 2 松木与柞木的二维切片
Fig.2 Two - dimensional slices of pine and oak

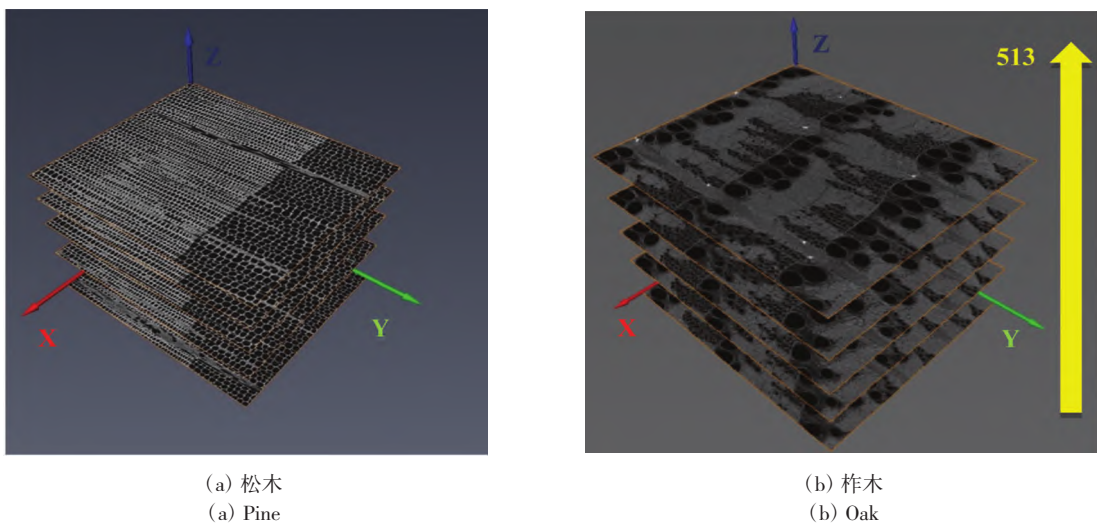


图 3 多层二维平面图像
Fig.3 Multilayer two - dimensional images

(2) 多层二维图像处理及量化分析: 用 Avizo (三维可视化软件) 进行噪声过滤获取清晰图像, 再

借助其数据功能计算面孔隙率, 将获得的数据导入 Origin 软件获取面孔隙率分布图, 如图 4 所示。

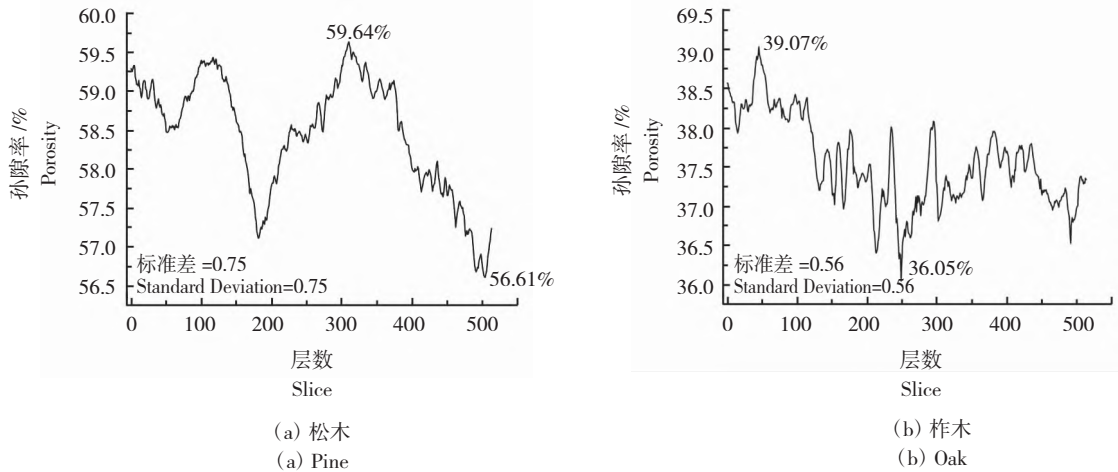


图 4 不同切片层下松木与柞木的面孔隙率

Fig. 4 Surface porosity of pine and oak under different section layers

(3) 三维图像重建: 运用 Avizo 软件进行立体渲染, 即将多层二维平面图像构建为三维立体图像。

1.4 孔隙提取及量化分析

通过上述操作后, 得到落叶松与柞木的三维重建模型, 将重建数据再次导入 Avizo 软件, 依据所要达到的预期效果进行操作, 主要操作步骤如下。

(1) 预处理: 包括图像裁切(针对具体部分进行详细分析)与噪声过滤(优化图像)。

(2) 阈值分割: 即对木材孔隙与基质进行分割, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

(3) 提取连通孔隙, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示。

(4) 标记及量化分析: 即通过标记确定每个三维孔隙结构, 并运用 Avizo 强大的数据处理功能定量计算诸如孔隙率(面、体)、孔面积、孔体积、孔径分布及连通性等参数。对于体量过多的数据须将其可视化, 将其导入 Origin 软件进行分析, 获取相关数据图形, 如图 6 所示。

2 结果与分析

2.1 二维孔隙结构表征与量化分析

由 X-CT 检测技术可获得不同方向切片的木材孔隙结构。图 2 为松木与柞木 3 方向的二维切片(横切面、径切面和弦切面), 为便于观察将 X-CT 扫描后的灰度图像进行彩色渲染, 其中浅黄色代表基质, 深黄色代表孔隙。由图 2 可清晰识别针叶与阔叶材主要构造, 如松木的轴向管胞、木射线及轴

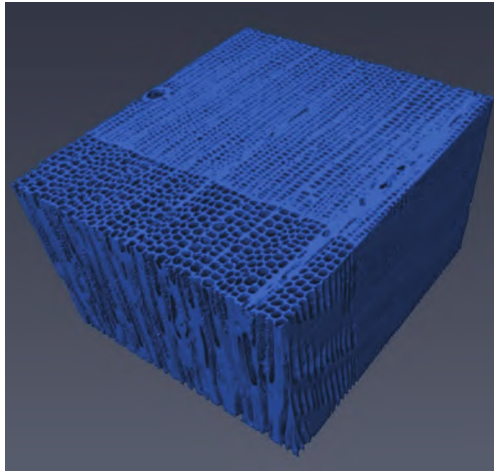
向薄壁组织, 柞木的导管、木纤维及木射线。

将图 3 的扫描切片沿 Z 轴(轴向)叠加, 获得不同层面的孔隙率, 即面孔隙率。图 4 为松木与柞木的横切面(共计 513 层)的各层面孔隙率分布图。其中, 松木孔隙率均值为 58.46%, 标准差为 0.75%, 波动范围为 56.61% ~ 59.64%; 柞木孔隙率均值为 37.57%, 标准差为 0.56%, 波动范围为 36.05% ~ 39.07%。由图 4 可知, 松木与柞木各层面的面孔隙率均存在一定差异, 此现象可能与木材材性变异有关, 例如, 柞木内部的导管并不是从试样表面到底部贯穿相通的, 如图 5 所示。与此同时, 形状也是受到生长的环境影响, 因此必然导致每层的孔径是存在差异的。本研究的体孔隙率差异表明, 以往采用扫描电镜获得二维图像从而测算面孔隙率, 并将其近似为体孔隙率的方法存在一定误差, 从这点可以看出 X-CT 检测的优势。

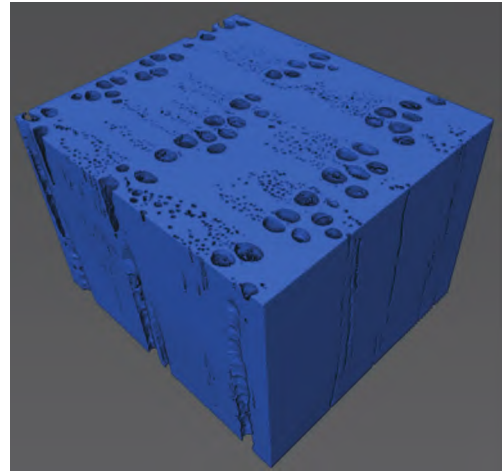
将本研究所获孔隙率与压汞实验结果进行对比发现, X-CT 检测结果明显小于压汞法测试结果(松木 73.18% 与柞木 44.26%)。试样为本研究 X-CT 扫描后同一样品, 设备型号为 Auto-pore IV 9500, 实验过程参考 Zhao 等^[14]。造成较大差异原因可能与 X-CT 分辨率和图像的孔隙、基质分割有关, 例如本研究检测为微米级孔隙, 而木材实际的纳米级孔隙并未获得, 因而导致检测孔隙体积小于压汞法测值。与此同时, 在图像处理过程中, 采用的阈值分割方法并未对孔隙与基质进行有效分割,

如 Hermanek 等^[15] 分析了不同阈值对孔隙率的影响,并对 X-CT 检测结果进行修正,而此方面的研

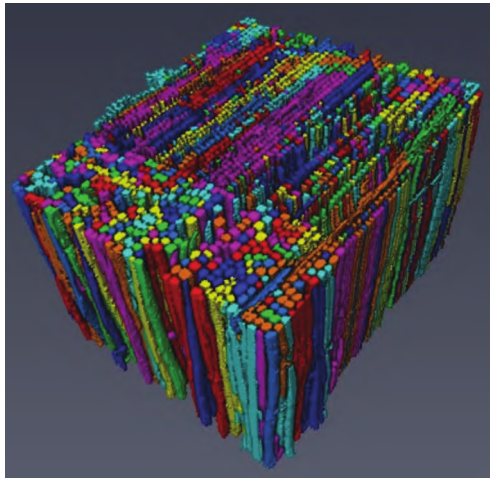
究一直是图像处理的难点,关于此方面的研究,本文不进行讨论。



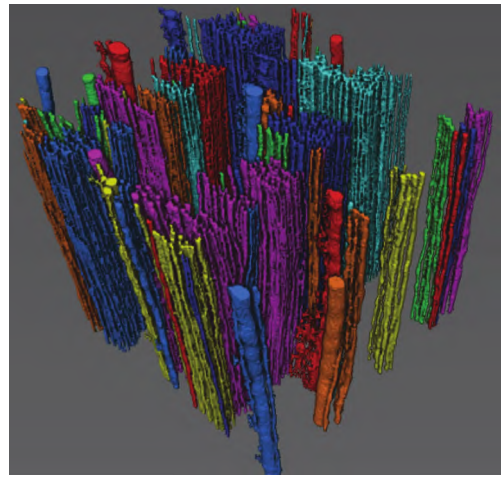
(a) 松木二值化的基质与孔隙
(a) Binary matrix and pore of pine



(b) 柞木二值化的基质与孔隙
(b) Binary matrix and pore of oak



(c) 松木连通孔隙分布
(c) Connected pore distribution of pine



(d) 柞木连通孔隙分布
(d) Connected pore distribution of oak

图 5 松木与柞木的三维孔隙结构

Fig. 5 Three - dimension pore structure of pine and oak

2.2 三维孔隙结构表征与量化分析

图 5 为通过数字图像处理后的三维孔隙结构,其中,图 5(a) 和图 5(b) 为通过断层叠加与二值化而成的三维结构体;图 5(c) 和图 5(d) 为轴向连通的孔隙结构。由图 5 可知木材三维孔隙结构与连通性等信息,其中,松木轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别约为 78.5% 与 80.3%;柞木轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别约 74.4% 与 67.3%。

检测过程中仅发现轴向孔隙具有连通性,而弦、径向并未发现,此现象可能与连通性定义有关。广义上,连通性是指空间或集合的一种拓扑性质,

直观地说,连通就是指连成一片过程没有间断。然而,在木材孔隙结构研究上,从底部到顶端贯穿整个木材的连通孔隙极少,而绝大多数是部分连通。本研究连通性检测或许过于苛刻,因而导致仅轴向孔隙具有连通性,而其他方向不具有。从图 5(c) 和图 5(d) 可以看出,横向的部分连通孔隙是存在的(同一颜色代表同一整体),因此后续可改进连通性定义公式,提出“局域连通性”的概念,更加精确地评定与量化孔隙连通性。另一方面可能与木材孔径识别精度有关,例如,本研究 X-CT 检测最小孔径约为 10 μm (表 1),而木材实际孔径存在纳米孔

径,因此未能识别实际横向连通性。

针对图5的三维孔隙结构,对其进行孔隙结构

参数量化分析,获得孔隙的孔面积、孔体积及孔径

分布等信息,如图6所示。

表1 松木与柞木孔隙结构基本参数

Tab.1 Basic parameters of pore structure of pine and oak

| 品种 Species | 最小孔径/ μm Minimum pore size | 最大孔径/ μm Maximum pore size | 平均孔径/ μm Average pore size | 孔体积/ μm^3 Pore volume | 孔面积/ μm^2 Pore area | 体孔隙率/% Volume porosity |
|---------------|--|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 松木 Pine | 9.65 | 79.51 | 26.03 | 1.58×10^{10} | 1.65×10^9 | 58.46 |
| 柞木 Oak | 11.01 | 319.68 | 51.24 | 1.01×10^{10} | 1.12×10^9 | 37.57 |

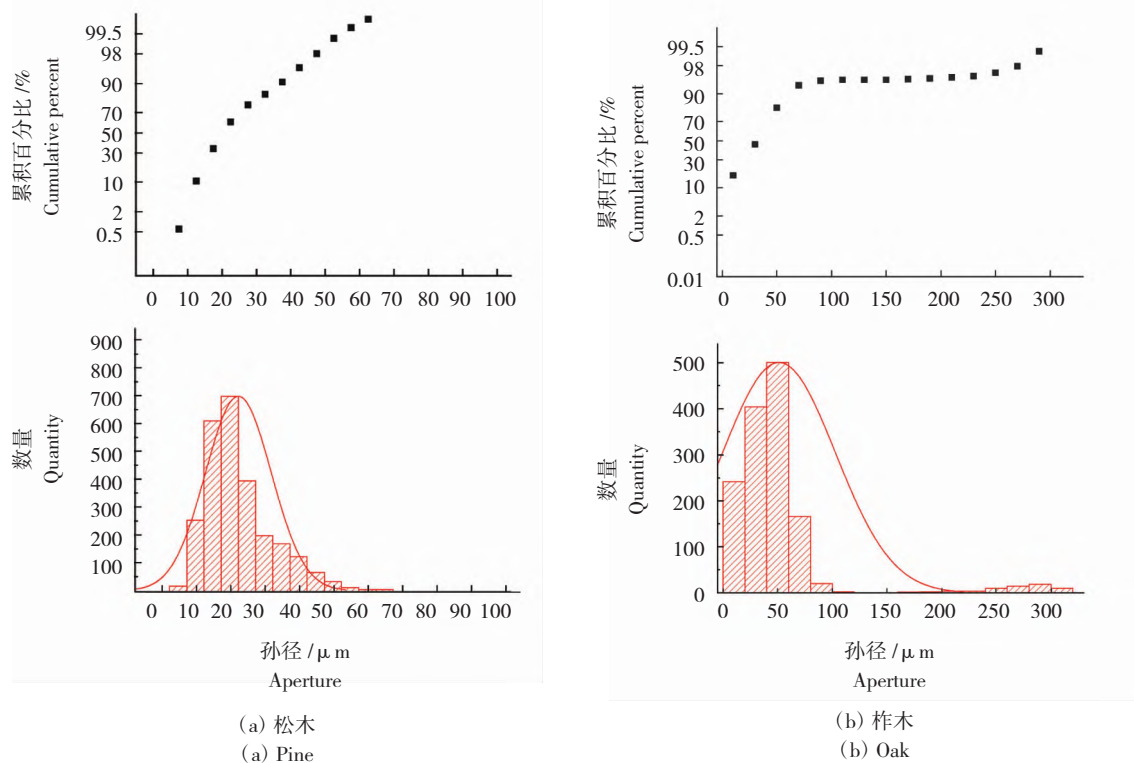


图6 孔径分布

Fig.6 Pore size distribution

图6为松木与柞木的孔径分布信息,受检测分辨率的限制,这并不是木材所涵盖的全部孔径范围,本研究孔径分布采用层叠法,即计算每层孔径分布后取其均值。松木孔径尺寸范围为9.65~79.51 μm ,平均孔径为26.03 μm ;柞木孔径尺寸范围为11.01~319.68 μm ,平均孔径为51.24 μm 。松木孔径呈现出正态分布趋势,即孔径尺寸分布较为均匀,累积百分比随孔径变化趋势较一致;而对柞木而言,由于针叶材与阔叶材的构造区别(如导管),导致孔径差异较大,例如导管孔径尺寸在300 μm 左右,因此累积百分比随孔径变化趋势差异较大。而对于孔体积与孔面积的分布,本研究并未给

出,主要原因为: X-CT设备配套的图像处理软件均采用球棒模型进行等效计算(本研究采用Avizo软件),这与实际木材真实的孔隙结构相差甚远,导致计算精度较差,前期相关研究可参见Guo等^[16]。

2.3 X-CT测量孔隙结构参数精度分析

本研究对针叶材松木与阔叶材柞木进行X-CT检测,计算诸如孔隙率(面、体)、孔面积、孔体积、孔径分布及连通性等特征参数。但是,该技术对于孔隙率、孔径分布等参数的测量精度而言,有待进一步讨论。主要原因有以下3方面:①在分辨率方面,如2.1中孔隙率对比分析所述,本研究检测为微米级孔隙,而木材实际的纳米级孔隙并未获得,因而

导致检测孔隙体积小于理论值;②在孔隙模型方面,X-CT技术孔径分布计算采用球体模型,这与木材近似圆柱体的孔结构差异较大;③在孔隙分割方面,本研究采用阈值分割对灰度图像进行孔隙与基质分离,但在实际操作中,存在肉眼看不见或极难分辨的孔隙,为此造成分割过度或不足等现象。

3 结论

运用X-CT技术检测木材孔隙结构,与数字图像处理技术结合,对木材孔隙结构进行定量分析与精细化地定量表征,所得主要结论如下。

(1) 该技术不仅可获得孔径分布、孔隙率、孔面积及孔体积的常规检测结果,还可获得三维孔隙结构及连通性等其他检测手段不能完成的检测数据。

(2) 边长3 mm的立方体松木样品内,孔径尺寸范围为9.65~79.51 μm ,平均孔径为26.03 μm ,孔体积为 $1.58 \times 10^{10} \mu\text{m}^3$,孔面积为 $1.65 \times 10^9 \mu\text{m}^2$,体孔隙率为58.46%,面孔隙率范围为56.61%~59.64%;轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别约为78.5%与80.3%。

(3) 同样尺寸的柞木样品内,孔径尺寸范围为11.01~319.68 μm ,平均孔径为51.24 μm ,孔体积为 $1.01 \times 10^{10} (\mu\text{m}^3)$,孔面积为 $1.12 \times 10^9 (\mu\text{m}^2)$,体孔隙率为37.57%,面孔隙率范围为36.05%~39.07%;轴向连通孔隙孔面积与体积占比分别约为74.4%与67.3%。

(4) 由于分辨率、孔径模型及分割方法的限制,本研究的检测精度有待提高,但此方面正是未来研究的主要方向,相信随着研究的进一步完善与深入,扩展X-CT技术在木材孔隙结构检测方面的能力,最终可获得更加精确且详细的孔隙结构信息,可为木材孔隙结构重构及导热、渗流及扩散模拟提供孔隙结构数据支撑。

【参 考 文 献】

- [1] 王哲,王喜明. 木材多尺度孔隙结构及表征方法研究进展[J]. 林业科学,2014,50(10):123-133.
WANG Z, WANG X M. Research progress of multi-scale pore structure and characterization methods of wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(10): 123-133.
- [2] YIN J P, SONG K L, LU Y, et al. Comparison of changes in micropores and mesopores in the wood cell walls of sapwood and heartwood[J]. Wood Science and Technology, 2015, 49(5): 987-1001.
- [3] 何盛,徐军,吴再兴,等. 毛竹与樟子松木材孔隙结构的比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):157-162.
- HE S, XU J, WU Z X, et al. Compare of porous structure of moso bamboo and *Pinus sylvestris* L. lumber[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(2): 157-162.
- [4] RAJAGOPAL H, KHAIRUDDIN A S M, MOKHTAR N, et al. Application of image quality assessment module to motion-blurred wood images for wood species identification system[J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(4): 967-981.
- [5] PLOTZE M, NIEMZ P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(4): 649-657.
- [6] 裴姗姗,胡进波,Clair Bruno,等. 氮气吸附法表征杨木应拉木的孔隙结构[J]. 林业科学,2011,47(10):134-140.
CHANG S S, HU J B, BRUNO C, et al. Pore structure characterization of poplar tension wood by nitrogen adsorption-desorption method[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(10): 134-140.
- [7] ZAUER M, HEMPEL S, PFRIEM A, et al. Investigations of the pore-size distribution of wood in the dry and wet state by means of mercury intrusion porosimetry[J]. Wood Science and Technology, 2014, 48(6): 1229-1240.
- [8] LI L L, WANG X M, YAN Y, et al. Pore analysis of thermally compressed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) by mercury intrusion porosimetry[J]. Holzforschung, 2017, 72(1): 57-63.
- [9] 李新宇. 利用时域核磁共振技术研究木材孔隙分布及水分运动[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学,2017.
LI X Y. The pore distribution and water movement in wood studied by time domain nuclear magnetic resonance technique[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [10] WILDENSCHILD D, SHEPPARD A P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems[J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 217-246.
- [11] ALKAN S, ZHANG Y L, LAM F. Moisture distribution changes and wetwood behavior in subalpine fir wood during drying using high X-ray energy industrial CT scanner[J]. Drying Technology, 2007, 25(3): 483-488.
- [12] BIZIKS V, ACKER J, MILITZ H, et al. Density and density profile changes in birch and spruce caused by thermo-hydro treatment measured by X-ray computed tomography[J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(2): 491-504.
- [13] PERNKOPF M, RIEGLER M, GRONALT M. Profitability gain expectations for computed tomography of sawn logs[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(4): 619-631.
- [14] ZHAO J Y, YANG L, CAI Y C. Combining mercury intrusion porosimetry and fractal theory to determine the porous characteristics of wood[J]. Wood Science and Technology, 2021, 55(1): 109-124.
- [15] HERMANEK P, CARMIGNATO S. Porosity measurements by X-ray computed tomography: Accuracy evaluation using a calibrated object[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 377-387.
- [16] GUO L Y, CHEN J F, CHEN W T, et al. Pore structure characterization of oak via X-ray computed tomography[J]. Bioresources, 2020, 15(2): 3053-3063.