

断层扫描技术在木材无损检测中的应用

葛浙东, 侯晓鹏, 李早芳, 周玉成

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 为实现木材缺陷的自动、高效检测, 提高木材利用率, 应用自主研发的 CT 设备扫描原木木段横切面, 并重建其二维图像和三切面视图。结果表明: 通过二维图像可观察横切面年轮、节子和裂纹等信息; 结合三视图和透视图可精确定位缺陷位置。为无损检测木材内部结构特征, 及木材分等提供依据。

关键词: 无损检测; 木材; CT 技术; 三视图; 透视图

中图分类号: S781.5; TP391.41

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654 (2016) 03-0049-04

Application of Computed Tomography (CT) in Nondestructive Testing of Wood

GE Zhe-dong, HOU Xiao-peng, LI Zao-fang, ZHOU Yu-cheng

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The authors developed nondestructive testing equipment to automatically and efficiently determine log defects for better wood utilization. It is based on computed tomography (CT) technology which can reconstruct a two-dimensional image and a three-section image of wood by scanning wood cross sections. The images provided by the equipment clearly and accurately show the positions of annual rings, knots and cracks in the wood. Based on these CT scans, these internal structural features can be used for nondestructive testing and for timber classification.

Key words: nondestructive testing; wood; CT technology; three-section view; perspective drawing

树木生长过程中受自然因素影响, 内部可能形成各种结构缺陷, 而缺陷特征是评价质量的重要指标之一^[1], 因此, 制材前对原木进行无损检测十分必要。常用的无损检测方法有: 激光检测、红外检测、机械应力波检测和核磁共振等^[2], 这些方法受木材密度、含水率等因素的影响, 重建的图像分辨率低, 且设备昂贵, 难以在木材加工领域推广。

计算机断层扫描 X 射线法 (CT) 作为一种先进

的无损检测技术, 具有穿透能力强、分辨率高和检测速度快等优点^[3], 已广泛应用于医学、工业和农业等领域^[4-6]。20 世纪 90 年代, 逐渐有学者应用医学 CT 设备对木材进行无损检测, 探究 X 射线与木材密度之间的关系, 提取结构材内部缺陷轮廓信息^[7-9]。但医学 CT 装置无法检测直径大于 600 mm 的物体, 成像软件也不适用于木材断层图像的分析处理, 且设备价格昂贵。

为拓展 CT 无损检测技术在木材领域的应用, 笔者开发了一套基于 X 射线的检测系统, 针对原木内部的年轮、死节、裂纹和孔洞等进行检测。鉴于不同树种木材的密度差异大, 内部结构复杂, 本研究随机选取 2 种密度和外观差异较大的杉木木段进行检测, 并观察断层成像结果, 判定缺陷大小和位置,

收稿日期: 2015-11-30; 修改日期: 2016-04-10

基金项目: 林业公益性行业科研专项“活立木/结构材层析成像技术与设备研究示范”(201304515)。

作者简介: 葛浙东 (1986—), 男, 中国林科院木材工业研究所博士研究生。

责任作者: 周玉成, 男, 中国林科院木材工业研究所研究员, 博士生导师。

以期为木材无损检测提供一个新的选择。

1 断层成像原理

按照 Lambert-Beer 定律^[10], 一束单能 X 射线穿过均匀物质后, 其强度按指数规律由 I_0 衰减至 I ,

$$I = I_0 e^{-\mu l} \quad (1)$$

早晚材、心边材和缺陷处木材密度不均匀, X 射线束通过时, 可将沿路径 l 分布的介质分为若干小块, $l_1, l_2, \dots, l_N$ 为相应的线段长度, 每一小块视为介质均匀的体积原素, 对应的线性衰减系数为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$, 则

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 l_1 + \mu_2 l_2 + \dots + \mu_N l_N)} \quad (2)$$

在样本扫描断层建立 x - y 直角坐标系, 由于断层内密度的不均匀, 令衰减系数分布为 $f(x, y)$ 。在某一方向沿某一路径 L 的射线强度变化为

$$I = I_0 e^{-\int_L f(x, y) dl} \quad (3)$$

通过图像重建算法重构样本断层图像, 图像的灰度值与样本体积元素的衰减系数相对应。式 3 取负对数后, 称为射线穿透物体后的投影, 记为 p , 为可测量的物理量, 是样本断层在 X 射线下的衰减系数沿直线 L 方向的线积分, 即试验中某一时刻获取的投影数据。

$$p = \int_L f(x, y) dl = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (4)$$

基于这一原理, 对样本进行扫描, 采集足够的投影数据, 并运用数据修正、差值运算和滤波反投影重建等方法^[10]处理数据, 确定各体素衰减系数值的二维分布矩阵, 重建木材断层 CT 图像。其技术路线, 如图 1 所示。

2 材料和方法

2.1 试验材料

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 木段, 2 段:

① 胸径 13.3 cm, 密度为 0.28 g/cm^3 , 外观具有节子、裂纹等特征, 采自浙江开化;

② 胸径 20.5 cm, 密度为 0.37 g/cm^3 , 开裂严重, 采自浙江临安。

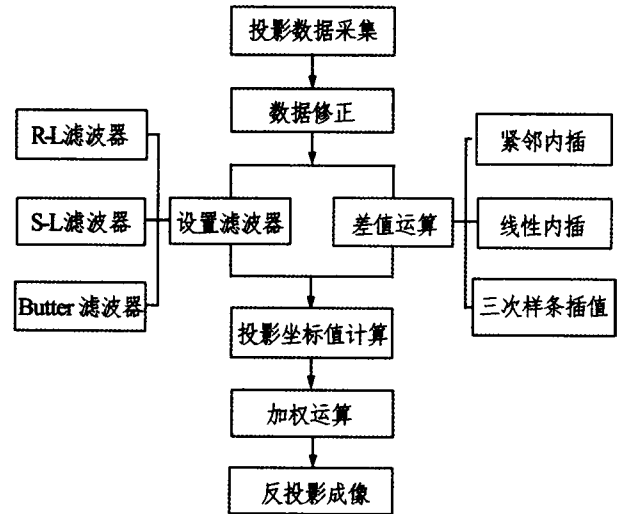
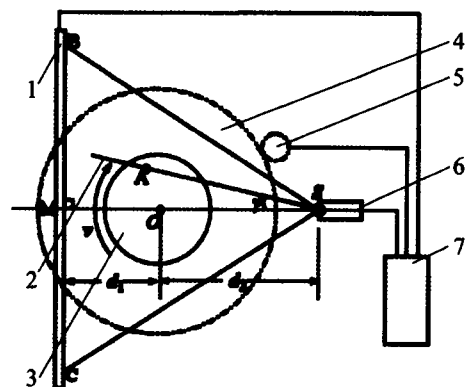


图1 断层成像流程

Fig.1 Flowchart of faultage imaging

2.2 试验装置

CT 系统试验装置, 结构如图 2 所示。



1. 平板检测器; 2. X 射线束; 3. 原木试件; 4. 旋转载物台;
5. 步进电机; 6. X 射线发射器; 7. 计算机

图2 试验装置结构

Fig.2 Structure of experimental apparatus

采用英国产的 IXS160 型 X 射线发射器; DS_LINX V3 型线性等距检测器; 发射器点光源焦点尺寸 0.05 mm , 输出功率 500 W , 最大射线张角 80° ; 检测器长 512 mm , 内部线性等距排列 1280 个像元, 每个像元尺寸 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 。

发射器和检测器安装于转台两侧, 旋转中心 O 位于射线源 S 和检测器中点 M 的连线上, 距检测器中点 391 mm , 距射线源 566 mm 。计算机通过 RS232 通信接口和发射器进行数据传输, 设置管电压、电流参数, 控制 X 射线发射器启停。计算机软件承载数据采集系统和图像重建系统。

2.3 试验方法

射线源工作电压、电流分别设置为 120 kV、0.7 mA，接收器积分时间设为 5 000 μ s。在扫描过程中，木段立于载物台中心，由步进电机驱动其匀速转动，转速为 1.5°/s，旋转一周为一个扫描周期，数据采集系统获取试件 360° 的投影数据用于断层图像重建；多层扫描时，断层间隔为 5 mm，依次扫描 24 层。每层重建图像由 1 024×1 024 个像素点矩阵构成，通过层间插值运算，获得 120 张横切面断层图像，用于重建三视图和透视图图像。

3 结果与分析

3.1 小径级杉木横切面 CT 图像

在不同视角下拍摄小径级杉木实物图及重建图像，如图 3 所示。

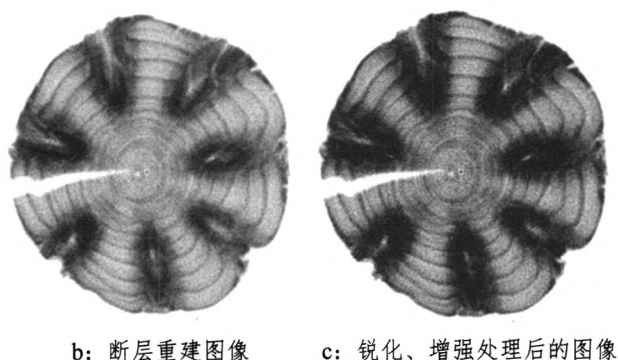
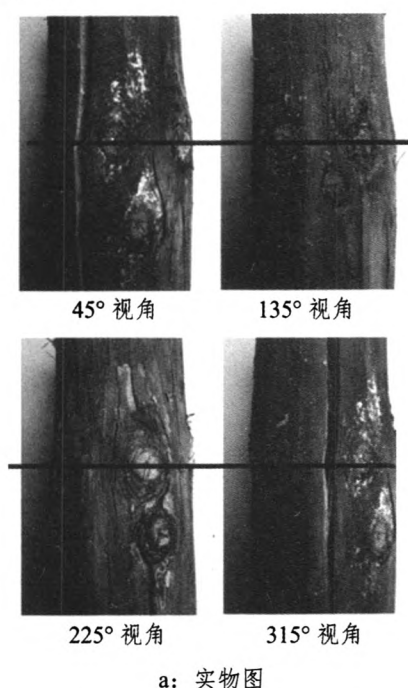


图3 小径级杉木图像

Fig.3 Images of small diameter Chinese fir

图 3a 中，水平标记线为木段切割线，7 个大小不同的节子分布于木段四周，径向裂纹延伸至木段内部。

图 3b 为通过 CT 扫描，重建横切面图像。木段内部节子、裂纹和年轮均肉眼可见，基本反映出木材横切面内部结构特征。

对重建图像做锐化和增强处理，得到图 3c。裂纹边缘和空气分界线明显，可明显看到裂纹开口延伸至木段髓心处；木段内部生长的 7 个节子颜色较深，和其它结构形成鲜明对比；边材年轮清晰可见，被节子和裂纹截断为 8 段。锐化和增强后的图像，中心部分环形伪影现象严重，使心材年轮的界线不明显。

3.2 大径级杉木 CT 图像

大径级杉木实物及重建图像，如图 4 所示。

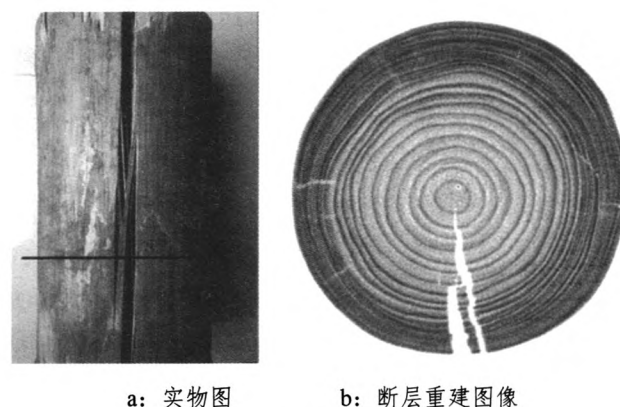


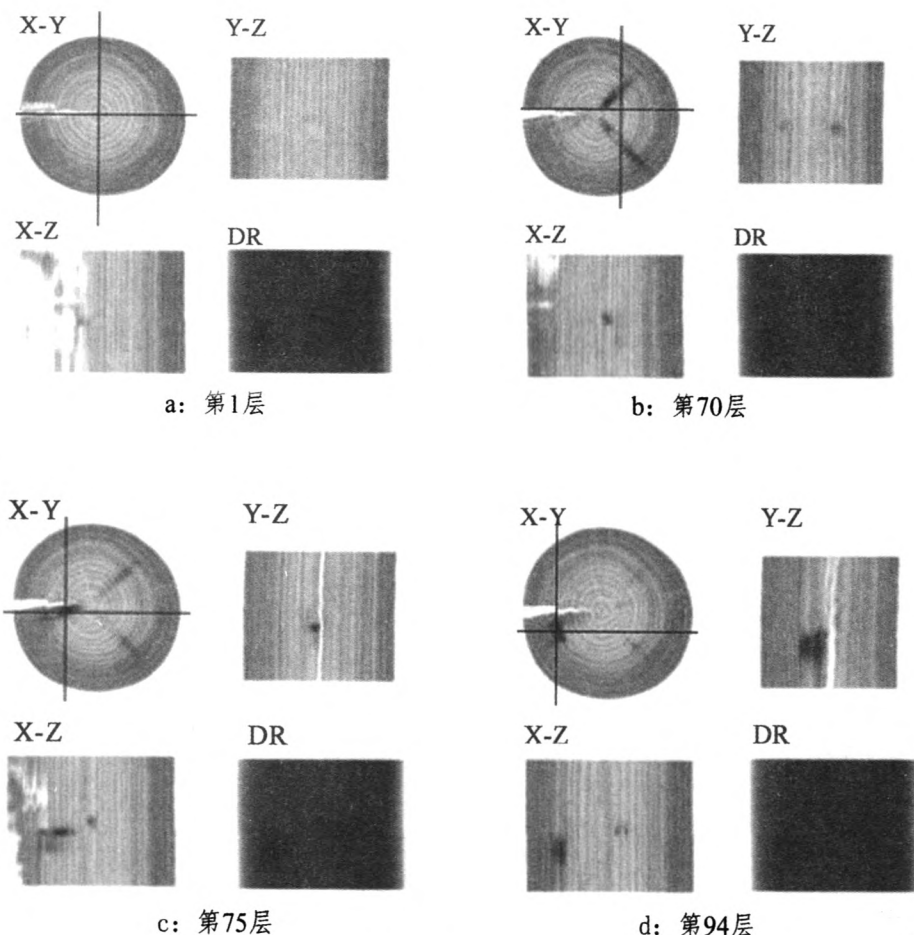
图4 大径级杉木图像

Fig.4 Images of large diameter Chinese fir

由图 4b 可见，心材年轮早晚材变化明显，界限分明，边材年轮密集，不易区分；两条裂纹中细裂纹较长，延伸至木段髓心处，粗裂纹开裂至心材边界。测量结果显示：粗裂纹宽 9.52 mm，细裂纹宽 3.66 mm，误差 ± 0.073 mm。

对试件多层扫描，插层后获得 120 层横切面断层图像，重建其三切面视图和透视图。顺次观察每层 X-Y 切面重建图像，发现第 60~100 层间的图像内存在异常结构。

选取有代表性的第 70、75、94 层图像与第 1 层图像对比，并移动切割线位置，结合 X-Z、Y-Z 切面断层图及 DR 图分析缺陷位置和特征，结果如图 5 所示。



X-Y: 横切面俯视图; Y-Z: 径切面或弦切面右视图;
X-Z: 径切面或弦切面主视图; DR: 透视图

图5 大径级杉木内部结构特征

Fig.5 Inner structural features of Chinese Fir

第1层 X-Y 图表明,除两段裂纹,内部无其他缺陷,移动水平切割线,可通过 X-Z 图观察木段高度方向裂纹变化规律;

第70层 X-Y 图表明,右侧两个节子呈“八”字分布,其形状和位置清晰可见, Y-Z 图两个黑色点状物为木段弦切面的节子断层图像,由于其包埋于木段内部,如仅通过肉眼观察木段表面,无法得知其内部含有节子缺陷;

第75层 X-Y 图表明,右侧两个节子尺寸减小且颜色变浅,左侧裂纹下方出现第三个节子,结合 DR 图可知,木段左侧节子比右侧节子位置低,两者位于不同断层平面;

第94层 Y-Z 图表明,木段裂纹左侧有黑色块状缺陷。结合 DR 图和 X-Y 图可知,缺陷在第三个节子下方,位于心边材交界处。

4 结论

应用自主研发的木材无损检测 CT 设备,可获取具有不同缺陷特征的木段的断层图像及其三切面视图和透视图,以此观察到木材断层的结构特征,如年轮、裂纹和节子等。通过分析三切面视图和透视图,可准确获取木材内部缺陷的形状、尺寸和位置等信息,利于木材等级划分,提高木材出材率和利用率。此外,该设备成本约为医学 CT 设备的 1/2,可进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 张训华,业宁,丁建文,等.原木 CT 图像 3D 重建及其虚拟加工技术研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(2): 77-80.
- [2] 戚大伟.基于分形理论的原木缺陷 X 射线图像分析和处理[D].哈尔滨:东北林业大学,2003: 2-7.
- [3] 彭冠云,江泽慧,刘杏娥,等. CT 技术在木材科学中的应用[J].世界林业研究,2010,23(5): 39-43.
- [4] 田捷,包尚联,周明全.医学影像处理与分析[M].北京:电子工业出版社,2003: 1-9.
- [5] 张朝宗.工业 CT 技术参数对性能指标的影响-兼谈如何选择工业 CT 产品[J].无损检测,2007,29(1): 48-52.
- [6] 徐澍敏,于勇,王俊.机械损伤苹果 CT 值的试验研究[J].农业机械学报,2006,37(6): 83-85.
- [7] Lindgren L O. Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density[J]. Wood Science and Technology, 1991, 25(5): 341-349.
- [8] Livingston R A. Nondestructive testing of historic structures[J]. Archives and Museum Informatics, 1999, 13(3-4): 249-271.
- [9] Jacobs P, Sevens E, Kunnen M. Principles of computerized X-ray tomography and applications to building materials[J]. The Science of the Total Environment, 1995, 167(1-3): 161-170.
- [10] 闫铨,李磊. CT 图像重建算法[M].北京:科学出版社,2014: 5-21.

(责任编辑 向琴、劳万里)