

计算机断层扫描技术(CT)在木材无损检测中的应用与发展

单海斌^{1,2}, 刘杏娥¹, 杨淑敏¹, 孙建平², 杨 喜¹

(1. 国际竹藤中心 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; 2. 东北林业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 介绍了计算机断层扫描技术(CT)技术在木材无损检测领域中的发展情况和独特优势, 从方法应用、结果判定、测试范围等方面详细阐述了国内外木材计算机层析成像检测的研究现状, 着重指出它在木材宏观构造识别、早晚材密度判定、木材内部缺陷预测、裂纹扩展过程的超高速扫描以及微观构造分辨等方面取得的技术成果。最后强调结合木竹材材性特征开发相应的 CT 无损检测技术, 为木竹基础科学研究以及高效利用提供技术支持。参 37

关键词: 木材学; 计算机断层扫描; 无损检测; 木材性质; 综述

中图分类号: S781.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)01-0123-06

Applications and development of CT in the wood non-destructive testing

SHAN Haibin^{1,2}, LIU Xing'e¹, YANG Shumin¹, SUN Jianping², YANG Xi¹

(1. Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science & Technology, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 2. Materials Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The paper reviewed the development and unique advantages of CT technology in the field of non-destructive testing of wood, elaborating on the status of timber CT inspection from method application, characteristics determination fest range. It highlighted the achievements of CT technology in the recognition of timber macro-structure, determining density of the early wood and late wood, predication of wood internal defects, ultra-high-speed scanning of crack propagation process and identification of microstructure. Finally, put stress on developing the corresponding CT technology wich combined with the characteristics of wood and bamboo, that provide technical support for wood and bamboo basic scientific research and utilization. [Ch, 37 ref.]

Key words: wood science; computed tomography (CT); nondestructive testing; wood properties; review

中国现有森林面积 1.95 亿 hm^2 , 居世界前列, 但人均森林面积不足世界人均占有量的 1/4^[1]。随着近年来中国经济的快速发展和人民生活水平的提高, 对木材的刚性需求不断增加, 木材供需矛盾加剧^[2]。如何充分利用好森林资源, 提高生物质材料利用率, 成为摆在中国林业科技人员面前一个亟须解决的重要课题之一。而无损检测因其实施方便、手段多样、结果可靠等优点于 20 世纪 50 年代被逐渐引入木材领域, 成为提高生物质材料利用率的重要技术手段。如可在制材前采用无损检测技术来对原木缺陷进行准确定位, 然后按最优原则割锯原木, 可在降低生产成本的同时增加出材率和提高生产效率。木材无损检测技术是 20 世纪 50 年代开始发展起来的一门新兴的、综合性的木材非破坏性检测技术^[2]。目前, 常用的木材无损检测方法有目测法、射线法、超声波法、核磁共振法、微波法和机械应力法等^[3]。射线法中的计算机层析成像(computed tomography, CT)检测由于其具有穿透力强、分辨率高、检测速度快、检测结果直观而且无需破坏被检测物等特点, 在木材无损检测领域显示出其独特的优越性, 成为延续至今

收稿日期: 2012-02-24; 修回日期: 2012-05-29

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费专项(1632010002); 国家林业公益性行业科研专项(201004005)

作者简介: 单海斌, 硕士, 从事材料无损检测研究。E-mail: shanhb_1986@hotmail.com。通信作者: 刘杏娥, 副研究员, 博士, 从事木材解剖特性研究。E-mail: liuxe@icbr.ac.cn

的一个研究热点^[4-6]。可以说, CT是当今影像技术中不可缺少的重要手段。

1 计算机断层扫描技术在木材领域的应用

计算机断层扫描也叫计算机层析照相技术, 简称为 CT, 是计算机与 X 射线技术相结合的产物^[7]。它的产生首先得益于 1895 年伦琴发现 X 射线, 然后在 20 世纪 60 年代美国物理学家 Cormack^[8]将奥地利数学家 Radon 的原理应用到医学领域, 为医用 CT 扫描仪的发明奠定了基础^[9]。1959 年杰伊恩(Jayne)首先提出木材无损测量的假说。随着 CT 技术的进步, 20 世纪 80 年代 CT 技术开始逐渐应用于木材无损检测领域。特别是 20 世纪 90 年代以后, 随着 CT 设备扫描分辨率的不断提高, 使依托该技术更深入研究木材内部结构特征和物理力学性质成为可能。经过 30 多年的发展, 其在木材工业领域已取得了令人瞩目的成果并展现出美好的应用前景^[10-11]。目前, CT 技术在木材无损检测领域的应用主要集中在以下 5 个方面。

1.1 木材宏观构造

木材宏观构造特征包括边材和心材、生长轮或年轮、早晚材、木射线、树脂道、管孔及轴向薄壁细胞等。对木材的宏观构造特征进行无损检测既是树木生物学研究的重要内容, 同时也是实现木材高效利用的要求^[12]。目前利用 CT 技术来检测木材宏观构造主要集中在髓心、心边材和生长轮这 3 个部分。

1.1.1 髓心的 CT 检测 髓心位于树木心材的中心, 其位置关系到年轮宽度的计算, 而年轮宽度是评价木材性质如密度及力学强度的重要参考因子之一。同时髓心与原木几何中心偏离又是预测应力木材的重要参考因子。所以自动检测原木的髓心位置对研究原木构造特征、原木合理下锯以及研究树木生长等方面均有重要的意义^[13]。目前, 已有的 CT 图像髓心自动识别研究中, 多数采用了霍夫变换(HT)。Bhandarkar 等^[14]利用 HT 进行圆周检测, 研究了 3 种阔叶材美国红橡树 *Quercus rubra*, 黑胡桃木 *Juglans regia* 和黑桤 *Acer saccharum* 的髓心位置, 提出一种基于 CT 图像的髓心检测算法: 首先对图像应用 Sobel 边缘检测算子; 然后把每个边缘点先计算在某半径区域内的圆周集合的中心, 这些圆周经过边缘点同时减少了霍夫累加数组中的元素; 最后, 选择累加数组中的最大值作为髓心位置。法国农科院南锡研究中心的 Longuetaud 等^[13]通过霍夫变换(HT)和插值增强, 实现了基于医学 CT 扫描的挪威云杉 *Picea abies* 髓心位置全自动检测。加拿大林产品创新研究院的 Alkan^[15]也开展过采用工业 CT 技术检测亚高山冷杉 *Abies lasiocarpa* 原木髓心的研究, 实现了自动检测并重建了原木髓心的三维图像。

1.1.2 心边材的 CT 检测 大多数树木的树干包括边材和心材两部分。对于心边材的区分不论是在树木生长研究领域还是木材加工领域都是十分重要的内容。特别是在木材加工领域, 由于心边材之间在物理性质以及技术加工特征, 如颜色、天然耐久性、浸透性能以及含水率等方面都存在差异, 影响到木材的加工和利用^[16]。研究表明: 欧洲赤松 *Pinus sylvestris* 作为用材林时其坚固耐用的心材更为人们青睐; 而作为纸浆材, 人们则更倾向于利用含次生物质较少的边材。此外, 为防止原木开裂, 通常需要对原木进行锯解。在锯解之前若知道原木的心边材分布等特征, 能实现更大限度的合理下锯。使用 CT 技术进行心边材区分和定位方面, Grundberg^[17-18]通过对 CT 图像进行低通滤波、阈值处理和梯度滤波处理, 再由原木髓心到心材边界沿半径方向隔 1°检测画图, 自动识别出欧洲赤松 *Pinus sylvestris* 原木心边材, 但该算法不适于带有节子的原木研究。Espinoza^[4]和 Rojas 等^[19]通过分类运算(最小距离算法和极大似然法)来处理糖槭 *Acer saccharum* CT 图像, 以从心材、节子和开裂等缺陷中识别边材。这种运算方法尽管观测到有相互交迭的类型, 但能给出好的分类结果。不过该方法还存在大型试样特别是高水分变异试样的运算稳定性方面的问题。Longuetaud 等^[16]在利用 CT 技术自动检测挪威云杉髓心的基础上, 通过高斯平滑处理、从髓心沿 360 个半径方向(间隔 1°)光栅化的阈值处理, 纵向插补来处理含节的片层图像以及四周插补处理, 自动检测到了心边材边界。Wei 等^[20]利用最大似然法实现了对糖枫节子及树皮、心边材的 CT 自动识别。

1.1.3 生长轮的 CT 检测 年轮(annual ring), 亦称生长层或生长轮。目前, 年轮的检测方法主要分为两大类, 即有损测量法和无损测量法。有损测量(即最常用的树木砍伐后数年轮的方法)会对树木造成不可恢复的损害。无损测量法是对树木生长不造成损害或损害很小的方法, 目前应用较多的是生长锥法, 此法虽不致树木死亡, 但仍对树木生长有一定的影响, 然而利用便携式 CT 设备可以弥补以上不足。在

一个生长轮出现早材和晚材是生长轮能形成明显界限构造的一项基础。已有研究表明，木材密度与其 CT 值之间存在显著的线性正相关，而早材和晚材的密度又有很大差异，所以，通过对树木进行 CT 扫描确定早晚材的分布，就能在不影响其正常生长的前提下快速检测生长轮。

1.2 木材缺陷检测

自 20 世纪 80 年代首次提出采用 X 射线技术检测木材内部缺陷的设想以来，世界上已有多个国家开始研究能自动处理和识别木材内部结构缺陷的 CT 检测技术，以便从新的角度认识木材内部结构与性质。如果能将 CT 缺陷检测系统与木材锯切优化软件相结合，将大幅度提高木材利用率^[21-22]。大量研究发现，有大约 40% 的原木存在集中一侧而导致质量下降的缺陷。如木材的初期腐朽，其对木材力学性质的影响非常大，研究表明：质量损失率在 5%~10% 时，木材的冲击韧性可损失 60%~80%，抗弯强度损失 50%~70%，而静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE)则损失 60%~70%，其他力学性质也有比较明显的下降^[23]。若能对缺陷准确定位并按最优原则割锯原木，可提高板材的经济效益达 8%~9%，对于个别板材甚至可达 30%^[24]。

20 世纪 80 年代，Funt 等^[25]利用二维图像解释技术区分无节材、节子、腐朽及虫眼。瑞典吕勒奥理工大学木材科学与技术研究所的 Hagman 等^[26]分别利用人工神经网络 BP 算法和偏最小二乘法，把欧洲赤松 CT 图像中的节子分离出来，并对节子进行有效分类，准确率达到 85%~97%。Oja^[27]通过分析挪威云杉原木 CT 图像来实现对节子大小和死节边界等节子特征以及树脂囊的识别。这种快速无损检测技术在识别较大节子时准确率较高，但对检测小节和探测死节边界效果较差。

1.3 木材密度检测

密度是木材重要的物理指标之一，几乎所有木材力学性能均与之相关。如木材密度与顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度及顺纹抗拉强度等 5 项力学性质都有直接的线性关系^[12]。木材密度也与树木的生长发育规律、干物质积累和一些化学性质如纤维素、半纤维素与木质素成分含量等有直接的关系，同时密度也是木材加工利用的重要参考依据之一。

由于 CT 成像的根本原理是密度成像，即把不同密度的物质对穿透射线(X 线)的衰减系数换算成物质的 CT 值，然后用图象的形式显示出来，因而图像上每个象素的灰度值对应于扫描断层中相应的单元体的密度。已有研究表明^[28]，木材密度与其 CT 值之间存在显著的线性正相关。

瑞典学者 Lindgren^[29-30]在利用 CT 技术检测木材密度方面作了系统的研究，随后法国、日本等国学者也开展过 CT 值与木材密度关系的研究工作。国内学者戚大伟、韩书霞等^[31-32]在分析处理木材 CT 图像以及测定木材密度方面开展了一些研究，得出了相似的结论，即 CT 值与木材密度有很好的线性关系，当 CT 值变化为一个单位(HU)时，其密度相对应的变化大约为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，这一关系几乎不受木材水分的影响。利用这一线性关系，根据早晚材不同的 CT 值，可研究木材早晚材密度的变异规律和年轮特征等。

1.4 木材断裂检测

木材在生长过程中容易产生节、疤、开裂等易造成应力集中的不连续的性质，因此在加工过程中，随着外界应力条件的改变，容易在其内部形成裂缝，这为日后的使用埋下了安全隐患。如果在加工前用 CT 对木材进行检测，就能快速准确的发现这些裂纹，这对于改进木材加工工艺，提高木材及其制品的安全性和使用寿命都有重要的意义。

另一方面，研究木材在外力作用下的断裂过程是认识木材破坏机制的一个重要方面。但由于裂纹扩展速度很快，用常规方法难以检测，如果借助超高速 CT(UFCT)设备研究裂纹在木材中的扩展，然后利用三维微米立体成像 X 射线显微镜(简称 MicroCT)分析断面上裂纹扩展时留下的残痕，为人们认识裂纹在木材中的扩展方式和扩展路径提供新的检测方法。费本华等^[33]利用 CT 技术研究了意杨 *Populus × canadensis* 'I-214'，落叶松 *Larix gmelinii* 和湿地松 *Pinus elliottii* 的断口形态特征。

1.5 高分辨率计算机 CT 成像图像在木材微观构造方面的应用

随着近年来科技的快速发展，高分辨率 CT 开始进入人们的视野。按照其分辨率大小可分为三维微米立体成像 X 射线显微镜(简称 MicroCT)和三维纳米成像 X 射线显微镜(简称 NanoCT)。MicroCT 最高空间分辨率可达到 $1 \mu\text{m}$ ；而一些 NanoCT 分辨力可达 30 nm 左右。

将高分辨率 CT 应用于木材科学研究，对于竹材这类薄壁材料及木材小节和死节边界的检测，以

及观察木材细胞结构和竹材维管束特征,建立三维模型都具有重大的意义。彭冠云等^[34-35]采用 MicroCT 对秋竹 *Pleioblastus gozadakensis* 和箬竹 *Qiongzhusua tumidinoda* 的节部进行扫描,在没有对节部进行制样的情况下,获得了竹节主干横切面上维管束及纤维分布清晰的图像,然后利用图像三维处理得到竹节部位的三维结构。

此外,Zhu 等^[36]用随机性纹理模型检测原木,这是首次利用空间自回归模型分析木材 CT 图像的纹理。Sepulveda 等^[37]也发表过通过利用简易 CT 来研究木材纹理的报道。

2 计算机 CT 成像检测技术的不足与展望

随着现阶段对 CT 在木材工业中应用研究的不断深入,如何克服 CT 技术的不足及其未来发展方向也是国内外学者研究的重点。

2.1 降低 CT 设备成本,提高检测精度

现阶段,由于工业 CT 设备价格高昂,所以在木材工业研究中使用的 CT 设备绝大多数是普通医用 CT,空间分辨率一般为 0.5~1.0 mm。这在检测较大直径的木材或不需要得到高分辨率图像的实验时暂且够用,若要对竹材等薄壁材料及木材小节和死节边界进行检测,就得不到清晰而准确的数据以致影响实验精度。

提高精度的方法主要有 2 个:其一就是采用多方法联合检测,这样既可提高准确率又能降低成本;其二就是采用工业 CT,而降低工业 CT 设备成本的途径就是通过延伸 CT 设备的应用领域,来扩大销售市场,实现批量化生产,最终达到降低设备成本的目的。另外,研究开发便携式小型 CT 设备也是降低设备成本的重要途径之一,而且便携式小型 CT 设备更有利于木材加工一线和野外活立木检测。

2.2 开发相应软件平台

虽然 CT 在木材内部结构检测方面有很好的适用性,然而到目前为止,除了瑞典等少数国家将 CT 技术投入到生产外,大多数国家仍处在研究阶段。由于 CT 先前主要应用于医疗检测,其自带的软件也是以适用医学治疗为主。当我们将 CT 引入到木材研究和实际生产时就必须开发相应的软件,而 CT 图像分析软件是由多学科多领域联合研发的成果,所以开发成本很高,增加了研究难度。

此外,复杂的木材性质和木材种类也不是普通医用 CT 软件平台所能分析处理的,所以在未来的专业木材 CT 图像分析软件平台的开发过程中可以结合人工神经网络,使 CT 设备具有模拟人类感知、学习和推理行为的能力,从而开发出一套不但能快速准确获得扫描数据,而且能同时检测多种木质材料的专业木材 CT 设备。

2.3 提高安全性

CT 设备是基于 X 射线对被检查物体进行断层扫描的原理来获得图像。图像的清晰度与扫描强度有关。而 X 射线是高能辐射电磁波,穿透能力很强。在扫描过程中一旦操作人员违规操作就会带来安全隐患,甚至会对人体的健康造成看不见的伤害。所以,如何制定安全科学的操作规范,严禁未经培训人员上岗操作也是未来研究的一个重要方面。

回顾 CT 技术的研究历程,作为一种先进的无损检测技术,其所具有的不破坏材料本体的条件下快速、准确的获取材料内部信息的特点,必将继续在木材工业研究领域发挥重要的作用。2010 年 1 月,中国重大科学工程——上海同步辐射光源(SSRF)通过国家验收并正式对中外各学科领域的科研用户开放,为中国学者利用同步辐射 X 射线相位衬度 CT 技术研究木材提供了技术平台,正是国家为推动中国 CT 技术研究的重要举措,同时也可以运用于中国木材二维和三维微观结构特征的研究。

参考文献:

- [1] 国家林业局.第 7 次全国森林资源清查主要结果(2004-2008 年)[EB/OL].2010-01-28[2012-02-20].<http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/65/content-326341.html>.
- [2] 江泽慧,彭镇华.世界主要树种木材科学特性[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 王莉娟.无损检测方法评估人工林杨木木材性质的研究[D].北京:北京林业大学,2005.
WANG Lijuan. *Non-Destructive Testing Methods to Assess the Properties of Plantation Poplar Wood* [D]. Beijing: Bei-

- jing Forestry University, 2005.
- [4] ESPINOZA G R, HERNANDEZ R, CONDAL A, *et al.* Exploration of the physical properties of internal characteristics of sugar maple logs and relationships with CT images [J]. *Wood Fiber Sci*, 2005, **37** (4): 591 – 604.
- [5] JERDRUM G P, HOIBO O. Heart wood detection in Scots pine by means of heat-sensitive infrared images [J]. *Holzals Roh Werkst*, 2004, **62** (2): 131 – 136.
- [6] SCHMOLDT D L, HE J, BBOTT A L. Automated labelling of log features in CT imagery of multiple hardwood species [J]. *Wood Fiber Sci*, 2000, **32** (3): 287 – 300.
- [7] 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.
XU Shumin, YU Yong, WANG Jun. Experimental study of the CT values of mechanical damage apple [J]. *J Agric Mach*, 2006, **37** (6): 83 – 85.
- [8] CORMACK A M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications [J]. *J Appl Phys*, 1963, **34** (9): 2722 – 2727.
- [9] 田捷, 包尚联, 周明全. 医学影响处理与分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [10] ROSS R J, BRIAN K B, ROY F P. Nondestructive evaluation of wood [J]. *For Prod J*, 2006 (1): 14 – 19.
- [11] 王立海, 杨学春, 徐凯宏. 木材无损检测技术的研究现状与进展[J]. 森林工程, 2001, **17** (6): 1 – 3.
WANG Lihai, YANG Xuechun, XU Kaihong. Wood nondestructive testing technology status and progress [J]. *For Eng*, 2001, **17** (6): 1 – 3.
- [12] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [13] LONGUETAUD F, LEBAN J M, MOTHE F, *et al.* Automatic detection of pith on CT images of spruce logs [J]. *Comput Electron Agric*, 2004, **44** (2): 107 – 119.
- [14] BHANDARKAR S M, FAUST T D, TANG Mingjin. CATALOG: a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography [J]. *Mach Vis Appl*, 1999, **11** (4): 171 – 190.
- [15] ALKAN S. *Industrial Computed Tomography (CT) Scanning of Subalpine Fir Logs: Proof of Concept* [R]. Vancouver: [s. n.], 2003.
- [16] LONGUETAUD F, MOTHE F, MOTHE, *et al.* Automatic detection of the heartwood / sapwood boundary with in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) logs by means of CT images [J]. *Comput Electron Agric*, 2007, **58**: 100 – 111.
- [17] GRUNDBERG S. *Scanning for Internal Defects in Logs* [D]. Skelleftea: Lulea University of Technology. Division of Wood Technology, 1994.
- [18] GRUNDBERG S. *An X-ray Log Scanner: a Tool for Control of the Sawmill Process* [D]. Skelleftea: Lulea University of Technology. Division of Wood Technology, 1999.
- [19] ROJAS G, CONDAL A, BEAUREGARD R, *et al.* Identification of internal defect of sugar maple logs from CT images using supervised classification methods [J]. *Holz Roh Werkst*, 2006, **64** (4): 295 – 303.
- [20] WEI Qiang, LEBLON B, CHUI Y H, *et al.* Identification of selected log characteristics from computed tomography images of sugarmaple logs using maximum likelihood classifier and textural analysis [J]. *Holzforchung*, 2008, **62**: 441 – 447.
- [21] ZHU Dongping. *A Feasibility Study on Using CT Image Analysis for Hardwood Log Inspection* [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993.
- [22] 童雀菊, 丁建文, 王厚立. 非破坏性木材内部缺陷检测(续): 木材 CT 扫描研究动态[J]. 林产工业, 2005, **32** (3): 14 – 16, 43.
TONG Queju, DING Jianwen, WANG Houli. Non-destructive wood internal defect detection (continued): timber CT scan dynamic [J]. *For Prod Ind*, 2005, **32** (3): 14 – 16, 43.
- [23] WILCOX W W. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength [J]. *Wood Fiber*, 1978, **9** (4): 252 – 257.
- [24] 张爱珍, 徐兆军, 王厚立, 等. 原木断层扫描图像的自动分割研究[J]. 信息技术, 2003, **27** (11): 62 – 64.
ZHANG Aizhen, XU Zhaojun, WANG Houli, *et al.* Automatic segmentation of the logs tomography [J]. *Inf Technol*, 2003, **27** (11): 62 – 64.
- [25] FUNT B V, BRYANT E C. Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography im-

- ages [J]. *For Prod J*, 1987, **37** (1): 56 – 62.
- [26] HAGMAN P O G, GRUNDBERG S A. Classification of scots pine (*Pinus sylvestris*) knots in density images from CT scanned logs [J]. *Holz Roh Werkst*, 1995, **53** (1): 75 – 81.
- [27] OJA J. *X-ray Measurements of Properties of Saw Logs* [D]. Lulea: Lulea University of Technology, 1999.
- [28] LINDGREN L O. The accuracy of medical CAT-scan images for non—destructive density measurements in small volume elements within solid wood [J]. *Wood Sci Technol*, 1991, **25**: 425 – 432.
- [29] LINDGREN L O. Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density [J]. *Wood Sci Technol*, 1991, **25**: 341 – 349.
- [30] LINDGREN L O. Non-destructive wood density distribution measurements using computed tomography [J]. *Holz Roh Werkst*, 1992, **50** (7/8): 295 – 299.
- [31] 戚大伟, 牟洪波. 具有图像处理功能的原木 X 射线检测系统[J]. 森林工程, 2007, **23** (1): 30 – 31, 75.
QI Dawei, MOU Hongbo. Log X-ray inspection system with image processing functions [J]. *For Eng*, 2007, **23** (1): 30 – 31, 75.
- [32] 韩书霞, 于雷, 孔超, 等. 基于计算机断层扫描技术的木材密度检测研究[J]. 森林工程, 2007, **23** (1): 19 – 23.
HAN Shuxia, YU Lei, KONG Chao, *et al.* Detection of wood density based on computed tomography [J]. *For Eng*, 2007, **23** (1): 19 – 23.
- [33] 费本华, 赵勇, 覃道春, 等. 应用 CT 技术研究木材断口形态特征[J]. 林业科学, 2007, **43** (4): 137 – 140.
FEI Benhua, ZHAO Yong, QIN Daochun, *et al.* Applying computerized tomography (CT) to study the feature of wood fracture [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (4): 137 – 140.
- [34] 彭冠云, 江泽慧, 覃道春, 等. 基于 CT 技术的人造板剖面密度检测[J]. 木材工业, 2009, **23** (5): 19 – 21.
PENG Guanyun, JIANG Zehui, QIN Daochun, *et al.* Wood-based panels profile density detection based on CT [J]. *China Wood Ind*, 2009, **23** (5): 19 – 21.
- [35] 彭冠云. 基于 CT 技术检测木材、竹材结构特征的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
PENG Guanyun. *Study on Detection of Structure Characteristics for Wood and Bamboo Using Computed Tomography* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [36] ZHU Dongping, BEECH A A. Robust spatial autoregressive modeling for hardwood log inspection [J]. *J Vis Commun Image Represent*, 1994, **5** (1): 41 – 51.
- [37] SEPULVEDA P, OJA J, GRONLUND A. Predicting spiral grain by computed tomography of Norway spruce [J]. *J Wood Sci*, 2002, **48** (6): 479 – 483.