

# 树盘干缩异向性引起应变的测算及分析

付宗营,赵景尧,蔡英春

(东北林业大学材料科学与工程学院,哈尔滨 150040)

**[摘要]** 研究探讨了干燥过程中树盘受抑制干缩应变、自由干缩应变、弹性应变、黏弹性蠕变应变以及机械吸附蠕变的图像解析测算法;运用该方法测算了白桦树盘常规缓慢干燥(含水率分布均匀)过程中干缩异向性引起的弦向各应变,分析了干燥过程中不同含水率阶段的应力状态及应力与各应变的关系。结果表明:应变的图像解析测算法可满足精度要求;树盘干燥至 fiber saturation point(FSP)以下,弦向首先受拉伸应力作用,随着干燥的进行,拉伸应力转变为压缩应力;应力方向与各应变对应关系不同,与黏弹性蠕变应变无明显对应关系,与机械吸附蠕变基本对应。

**[关键词]** 图像解析法;树盘;干缩异向性;干燥应力;弦向应变

**[中图分类号]** S781.29 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)04-0025-05

## 1 前言

木材干燥过程中,应力的产生和发展是干燥缺陷产生的主要原因,制约着木材的高效利用。因此,其检测与研究一直是木材行业攻关的重点。

早在20世纪50年代McMillen<sup>[1]</sup>就提出利用分层切片法测定木材干燥应力,一直沿用至今。Skaar<sup>[2]</sup>提出声发射间接测量法,通过测量干燥时木材轻度开裂而释放出的弹性波大小和频率来判断木材干燥应力的状况。随着研究理论的逐步完善以及相关仪器的发展,出现了光学法、应变片法、非接触法等诸多方法,但由于使用条件、精度等局限未能推广。长久以来,切片法作为木材干燥过程中应力、应变检测的常规方法,一直备受研究者们青睐。李大纲等<sup>[3]</sup>用切片法对杨木高温干燥过程中各应变进行过测定,并对整个干燥过程中各应变变化特点进行了分析。Erickson等<sup>[4]</sup>用切片法研究了红栎木干燥及平衡处理前后的机械吸附蠕变。切片法的主

要缺点是,采用千分尺或游标卡尺等测量工具接触式测量切片尺寸,大大增加了人为误差;除干缩应变外,其他各应变数量级都小于 $10^{-2}$ ,测量工具的精度不能满足要求;切片翘曲变形后复位困难,影响其长度测量精度。近年来,数字图像等现代手段逐渐用于木材干燥应力的测量,图像解析法就是其中之一。

对于树盘干燥过程中应变的研究,主要集中于受抑制干缩应变(总应变)。Kang W等<sup>[5,6]</sup>对高频真空干燥过程中落叶松树盘的弦向总应变沿径向分布情况进行过研究。Li等<sup>[7]</sup>曾在上述研究基础上,研究了高频真空干燥过程中落叶松树盘承受外部压载荷时弦向应变的分布和变化。目前为止,关于树盘干燥过程中各种不同类型应变的区分检测则未见报道。因此本研究旨在运用图像解析法测算白桦树盘常规缓慢干燥过程中干缩异向性所引起的弦向各应变,对干燥过程中不同含水率(MC)阶段的应力状态进行分析,并探讨应力与各应变的关系。

**[收稿日期]** 2013-12-06

**[基金项目]** 国家自然科学基金面上项目(31270595)

**[作者简介]** 蔡英春,1960年出生,男,内蒙古宁城县人,研究方向为木材干燥;E-mail:yhc@aliyun.com

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

22年生人工林速生白桦(*Betula platyphylla* Suk)树盘若干,平均径级25 mm,刨光后厚度30 mm,初含水率60%。从中选择无明显缺陷的树盘10块,其中4块用于确定初含水率和目标含水率,剩余6块分两组作为应变测量试件。实验在GDS-100恒温恒湿干燥箱内进行,采用干球温度恒定,相对湿度阶段性递减的缓慢干燥基准,以确保干燥过程中木材内部含水率分布均匀,从而消除由含水率分布不均所产生的差异干缩应力,只研究由木材干缩异向性所产生的内应力。

### 2.2 树盘干燥过程中各种应变的图像解析测算法

#### 2.2.1 应变切片尺寸的图像解析法检测

图像解析测算法是一种基于图像分析,非接触式的点距测量方法,其主要利用高分辨率的数码设备在木材干燥的不同含水率阶段将被测对象连同标尺共同采集图像,而后将图像导入ImageJ等软件对其实际长度进行测量分析。

按图1所示进行应变切片(30 mm(弦向)×10 mm(径向))划线及长度测点标定,干燥至不同阶段对树盘称重,并对划线的表面连同标尺采集图像;当其干燥至目标含水率时,称重、采集图像后沿划线劈解为应变切片,为避免其翘曲变形,采集图像时需要将应变切片连同其他部分复位,并用弹力绳捆绑或用其他卡具夹持。使用自行制作的数字图像采集装置采集图像,即将相机固定在铁架装置上,镜头距测试平面20 cm,标尺垂直于镜头水平摆放在测试平面上,同时在测试平面进行划线定位,以保证每次采集图像试件放置于同一位置。

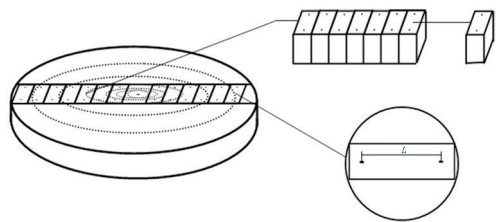


图1 树盘划线及应变切片劈解示意图

Fig.1 The cutting diagram of strain slices

#### 2.2.2 应变切片不同状态时的尺寸

图2为应变切片不同状态时的尺寸示意,主要基于Rice、Zhan等的研究<sup>[8-11]</sup>。

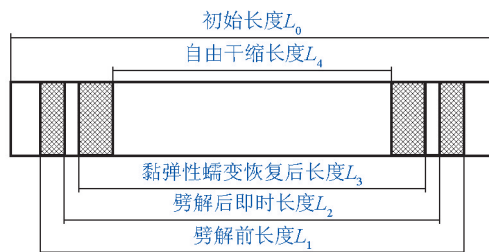


图2 应变切片不同状态时的尺寸

Fig.2 The size of the strain slice at different drying states

图2中, $L_0$ 为干燥前应变切片两测点间距离; $L_1$ 为干燥至含水率为26%、18%、10%时,树盘劈解前应变切片两测点间距离; $L_2$ 为干燥至目标含水率,沿划线将树盘劈解,即时的应变切片两测点间距离; $L_3$ 为将劈解后的应变切片置于恒温恒湿箱内(介质状态所对应的平衡含水率等于应变切片劈解时的含水率),尺寸稳定后两测点间距离; $L_4$ 为将测完 $L_3$ 后的各切片用水浸泡24 h,然后汽蒸处理10 h,置于维持上述温湿度介质条件的恒温恒湿箱内,自由干缩至稳定状态后应变切片两测点间距离。

$L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 采集图像前以及应变切片置于恒温恒湿箱的处理过程中,应将其与其他部分复位并用弹力绳捆绑,以防止其因翘曲变形而影响测量精度。

#### 2.2.3 干燥过程中各应变计算

受抑制干缩应变(总应变):  $\varepsilon_R = (L_0 - L_1)/L_0$ ; 弹性应变:  $\varepsilon_E = (L_1 - L_2)/L_0$ ; 黏弹性蠕变应变:  $\varepsilon_V = (L_2 - L_3)/L_0$ ; 机械吸附蠕变:  $\varepsilon_M = (L_3 - L_4)/L_0$ ; 自由干缩应变:  $\varepsilon_F = (L_0 - L_4)/L_0 = \varepsilon_R + \varepsilon_E + \varepsilon_V + \varepsilon_M$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 树盘干燥过程中干缩异向性引起的应力状态分析

树盘干燥至 fiber saturation point (FSP) 以下,结合水的流失会使树盘发生干缩。由于弦、径向干缩差异(一般弦向干缩是径向的2倍),弦向干缩会受径向干缩的抑制作用。该作用力由髓心向外成辐射状分布(单位环面作用力 $f_i$ )。另外,干缩异向性引起的各环层差异弦向应变(弦向自由干缩应变与实际受抑制干缩应变之差)与半径以及弦、径向自由干缩率的差值成正比<sup>[12]</sup>,因此,每一环层都要受到与之相邻外层的微小压力(单位环面压力 $f_o$ )作用。在某一环状层上选取任意弦向微元为研究对象,受力如图3a所示,其中 $F_1$ 和 $F_2$ 分别为作用在该微元体上

$f_1$ 和 $f_2$ 的合力,  $T_1$ 、 $T_2$ 为该微元受到的同一环层与其相邻部分的切向拉力, 该二力的合力  $T$  与  $F_1$ 和 $F_2$ 的合力  $F$  相平衡。

图3a中, 微元体在两切向拉力下产生弦向拉伸弹性应变, 随着作用时间的增加产生黏弹性蠕变应变, 当切向拉力超过比例极限后将产生机械吸附蠕变(塑性变形), 超过弦向抗拉强度极限时将开裂。拉伸塑性变形的存在使得弦向收缩受到抑制, 而径向则在压应力下收缩。随着干燥的进行, 当弦、径向收缩暂时一致时内应力为0; 此后, 径向收缩必定会超过弦向收缩, 应力开始转向, 各环层由于对其内部木质径向收缩的抑制而受到其相邻内层的拉

应力作用(单位环面作用力 $f_1$ ), 同时, 由于此前外一层比与其相邻的内层拉伸塑性变形大, 将导致前者作用于后者微小的拉伸应力(单位环面作用力为 $f_2$ )。同样, 在树盘任意环状层上选取一弦向微元为研究对象, 其受力分析如图3b所示,  $F_1$ 和 $F_2$ 分别为作用在该微元体上 $f_1$ 和 $f_2$ 的合力;  $T_1$ 、 $T_2$ 为该微元体受到的同一环层与其相邻部分的切向压力, 该二力的合力  $T$  与  $F_1$ 和 $F_2$ 的合力  $F$  相平衡。不同部位微元体由拉伸应力向压缩应力转变时的含水率状态, 取决于各环层弦向拉伸和径向压缩塑性变形的大小, 前者与半径成正比, 后者与半径成反比。

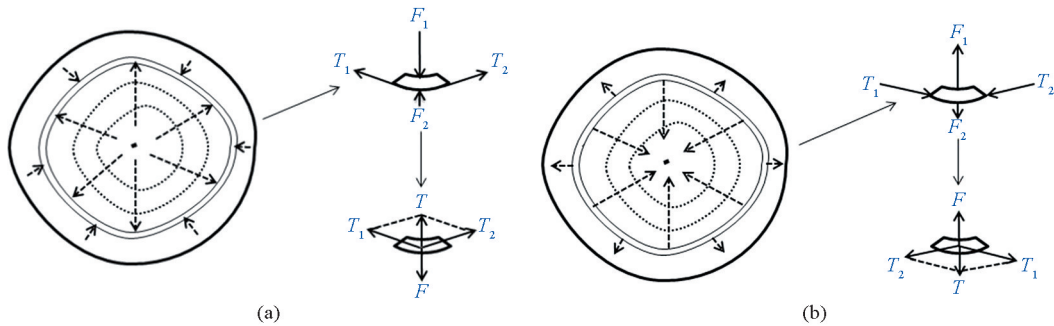


图3 树盘应力分析示意图

Fig.3 The diagram of stress analysis in wood disks

### 3.2 树盘干缩异向性引起的弦向应力与各应变关系分析

含水率为26%时, 树盘各部位产生了弦向拉伸应力, 在其作用下, 各部位弦向产生了拉伸弹性应变、拉伸黏弹性蠕变应变, 除近树皮部位外, 其他区域产生了拉伸塑性变形(机械吸附蠕变)。心材蠕变值明显高于边材, 说明心材较边材易产生蠕变。含水率为18%时, 应力已经由拉伸状态转变为压缩状态, 在压缩应力下产生了压缩的弹性应变, 而其黏弹性蠕变依旧表现为拉伸状态, 说明应力转向时间短, 拉伸黏弹性蠕变尚未完全恢复; 对于机械吸附蠕变, 其整体表现为压缩状态, 这是由于前期产生的弦向拉伸塑性变形为局部变形, 在干燥至应力转向之后, 该部分变形逐渐恢复甚至产生反变形, 而其他部分则产生更大弦向压缩变形, 因此整体表现为压缩机械吸附蠕变应变。当含水率降至10%时, 各部位在弦向压缩应力作用下表现为压缩弹性应变, 但其应变值较之前略有减小。在压缩应力作

用下, 黏弹性蠕变除局部位置因其材性异常而恢复, 继而成压缩状态外, 其他部位则恢复至0值附近; 而压缩塑性变形逐渐积累, 其值也相应增大。不同含水率阶段各径向部位弦向应变见图4。

## 4 结语

1) 利用图像解析法测算复位捆绑试件的长度可减小采用千分尺或游标卡尺测量长度过程中的人为误差, 因而计算出的树盘弦向各应变精度更高。

2) 树盘干燥至FSP以下, 首先受拉伸应力作用; 随着干燥的不断进行, 拉伸应力转变为压缩应力。该实验下, 应力转向发生在含水率自26%降至18%的过程中。

3) 不同部位微元体由拉伸应力向压缩应力转变时的含水率状态, 取决于各环层弦向拉伸和径向压缩塑性变形的大小, 前者与半径成正比, 后者与半径成反比。

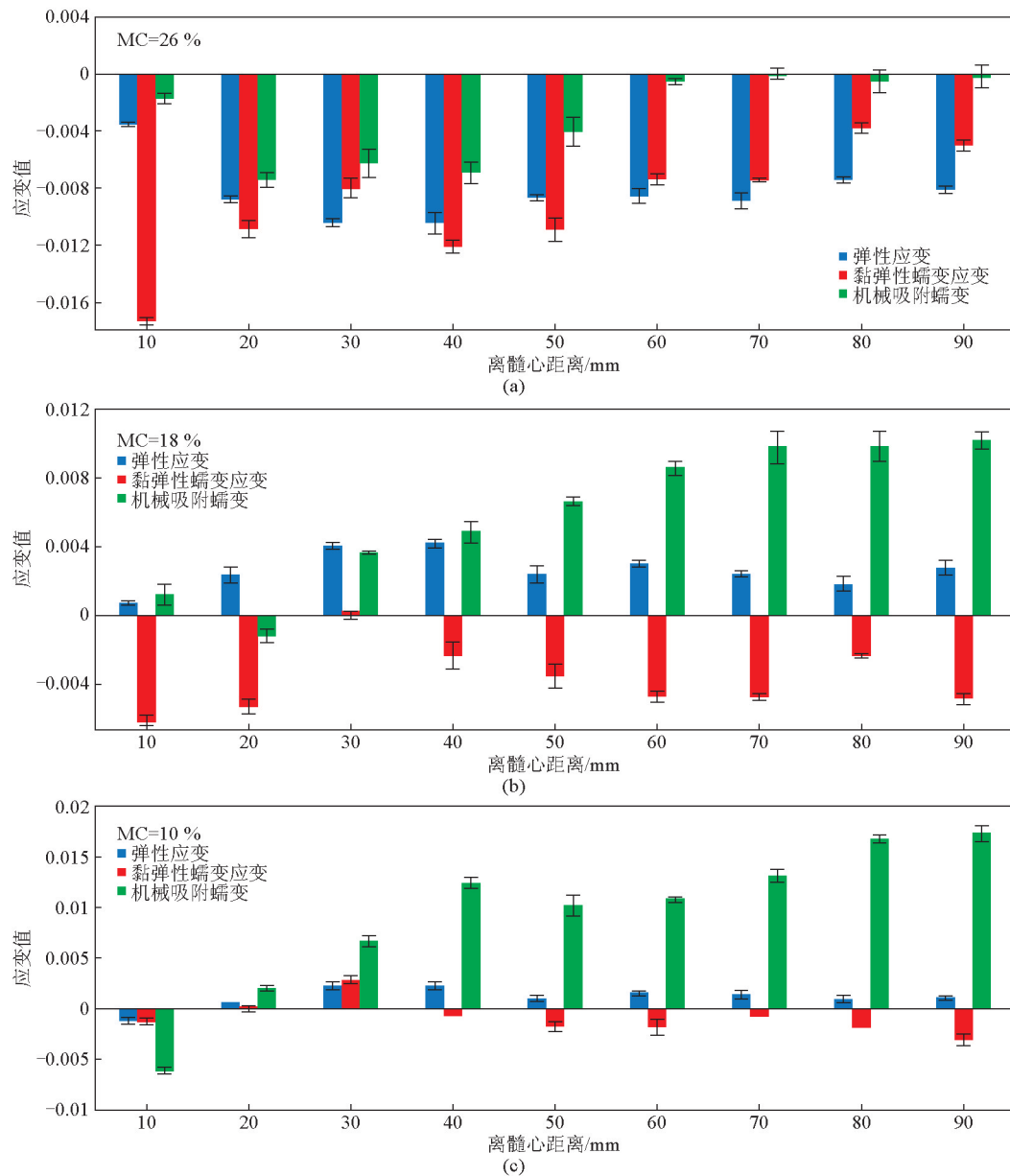


图4 不同含水率阶段各径向部位弦向应变

Fig.4 The radial distribution of each strain at different MC

4) 应力方向与各应变对应关系不同。与黏弹性蠕变应变无明显对应关系, 含水率为18%时, 压缩应力下表现为拉伸的黏弹性蠕变应变; 与机械吸附蠕变基本对应, 但受材性影响显著。

#### 参考文献

- [1] McMillen J M. Drying stress in red oak[J]. Forest Products Journal, 1955, 5(2): 71-76.
- [2] Skaar C, Simpson W T, Honeycutt R M. Use of acoustic emissions to identify high levels of stress during oak lumber drying[J]. Forest Products Journal. 1980, 30(2): 21-22.
- [3] 李大纲, 顾炼百. 杨木高温干燥过程中表层流变特性的研究[J]. 林业科学, 1999, 35(1): 83-89.

- [4] Robert W Erickson, Robert Seavey. Energy quantification and mechano-sorptive behavior in the kiln drying of 2.5 cm thick red oak lumber[J]. Drying Technology, 1992, 10(5): 1183-1206.
- [5] Kang W, Lee N H, Cho J H. A radial distribution of moistures and tangential strains within a larch log cross section during radio-frequency/vacuum drying[J]. Holz Roh Werkst, 2004, 62(1): 59-63.
- [6] Kang W, Lee N H. Relationship between radial variations in shrinkage and drying defects of tree disks[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(3): 209-216.
- [7] Li C Y, Lee N H. Effect of external compressive load on tangential strain behavior in Japanese larch log cross sections during radio-frequency/vacuum drying[J]. Journal of Wood Science, 2007, 53(4): 291-295.



- [8] Rice R W, Youngs R L. The mechanism and development of creep during drying of red oak[J]. Holz Roh Werkst, 1990, 48(1): 73-79.
- [9] Zhan J F, Gu J Y, Shi S Q. Rheological behavior of larch timber during conventional drying[J]. Drying Technology, 2009, 27(10): 1041-1050.
- [10] 战剑锋, 顾继友, 蔡英春, 等. 木材流变学特性对板材常规干燥开裂、变形的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(10): 33-36.
- [11] 战剑锋, 顾继友, 艾沐野. 白桦木材干燥过程横纹流变特性的初步研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 174-179.
- [12] 杨亮庆. 枫桦圆盘预处理及干燥特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

# Investigation of tangential strain caused by shrinkage anisotropy using image analytical method

Fu Zongying, Zhao Jingyao, Cai Yingchun

(College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**[Abstract]** This study investigated the image analytical method which was used to measure the tangential strains, including practical shrinkage strain, free shrinkage strain, elastic strain, viscoelastic creep strain, and mechano-sorptive (MS) creep, which caused by shrinkage anisotropy during slow conventional drying of wood disks. Also we analyzed the stress in different moisture content (MC) and the relations between stress and strain. The results showed that the image analytical method could meet the requirements in accurate level; below the fiber saturation point (FSP), the wood disks were initially subject to tangential tensile stress; with the decreasing MC, the tensile stress turned into compressive stress. The relations between stress and strain were complex. It had no obviously corresponding connections with the viscoelastic creep strain, and it was almost corresponding with the MS creep.

**[Key words]** image analytical method; wood disks; shrinkage anisotropy; drying stress; tangential strain