

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021167

基于数字图像相关技术的蒙古栎锯材干燥端面应变规律研究

段云佳, 卢昊, 蔡英春, 钱呈, 孟泓旭, 金正珉, 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), 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 以20 mm厚蒙古栎锯材为研究对象, 采用数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术实时监测其端面干燥过程中宽度(弦向)、厚度(径向)方向应变的分布, 并分析干燥温度对宽度、厚度方向应变的影响。结果表明: 在相同含水率的条件下, 随着干燥温度的升高, 沿厚度与宽度方向各层应变增大。中间与两侧部位之间应变差值, 在40 °C时为0.042, 80 °C时提高到0.059。锯材厚度方向应变数值增长趋势均相近, 因此得出锯材干缩异向性的差异主要来自于锯材的宽度方向; 40 °C下锯材的干缩异向性数值大于80 °C时的干缩异向性数值。DIC技术是非接触式检测木材干燥应变的有效手段, 形变分布与传统检测手段结果相符, 同时还可将干燥形变过程可视化。

关键词: 干燥应变; 数字图像相关技术; 含水率分布

中图分类号: S781.71

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694(2022)03-0058-07

Study on the Drying Strain of Cross-Section of *Quercus mongolica* Lumber Based on DIC Technique

DUAN Yun-jia, LU Hao, CAI Ying-chun, QIAN Cheng,
MENG Hong-xu, JIN Zheng-min, ZHAO Jing-yao

(Key Laboratory of Bio-based Material Science & Technology (Northeast Forestry University),
Ministry of Education, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To analyze the stress-strain law and shrinkage difference during the drying process, the strain profile of 20 mm thick *Quercus mongolica* lumber along the width and thickness directions was monitored respectively by the digital image correlation (DIC) technique. This research analyzed the difference of drying strains in width and thickness directions and the effect of the temperature. The results indicated that the DIC was an effective non-contacted method of detecting the drying strain in wood. The DIC can visualize the drying deformation process while the results obtained by DIC was consistent with those of traditional detection methods. Meanwhile, under the condition of the same moisture content, the strain of each layer along the thickness and width directions increased progressively as the temperature increased. At the temperature of 80 °C, the difference of strain between the middle position and both sides

收稿日期: 2021-12-01; 修改日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“基于孔道分形网络的木材水分迁移干缩效应机制”(31901242); 黑龙江省自然科学基金“木材干燥流变特性精细表征及应力-应变模型构建”(LH2020C038)。

作者简介: 段云佳(1997—), 男, 硕士研究生。Email: 760404296@qq.com

通讯作者: 赵景尧, 男, 讲师。Email: zjy_20180328@nefu.edu.cn

were 0.059; whereas at the temperature of 40 °C, the difference decreased to 0.042. The strain values and trends along the thickness direction of *Quercus mongolica* lumber were similar with those along the width direction. The wood shrinkage anisotropy was mainly derived from the width direction. Meanwhile, the value of wood shrinkage anisotropy was greater at 40 °C than at 80 °C.

Key words: drying strain; digital image correlation(DIC) techniques; moisture content distribution

木材干缩应变是干燥应力产生的主要原因之一^[1], 当干燥应力超过木材自身的强度极限时会出现翘曲、弯曲、皱缩、开裂等缺陷^[2], 因此木材的干缩、应力及应变检测尤为重要。木材干缩应变的测量方法包括传统切片法^[3]、瓦弯法^[4]、声发射法^[5]和电测法等^[6]。其中传统切片法和电测法因容易掌握且操作简单, 应用最为广泛, 一直沿用至今。但传统切片法流程繁多且使用游标卡尺, 无法保证测量精度; 电测法在测量过程中往往需要将灵敏度较高的压电式电阻应变片粘贴在木材表面, 当木材表面含水率较高时, 普通胶黏剂难以粘牢, 特效胶黏剂会因胶层过硬而影响木材原有的胀缩性能, 应变片粘贴处无法进行正常水分蒸发而使该处干缩失去代表性, 不能实现木材干燥过程中表层应变的精准在线检测。光学检测手段是以试验对象物体表面图像的灰度信息为基础, 使用先进计算机视觉图像处理技术, 将试验检测对象的表面变形前后的图像灰度信息进行对比分析, 从而无接触式测量出变形前后的全场位移和应变情况, 可以避免传统测量方法中存在的问题。

20世纪80年代初, Peter^[7]教授团队提出以数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术可视化木材横切面收缩行为的方法。不同学者开始以此技术为基础, 探讨不同干燥条件下木材干燥过程中尺寸与应力应变的变化并绘制了应变分布等高线图^[8-12]。Larsen^[13]团队根据现有的数据建立了原木应力应变模型, 模拟结果与DIC测量结果相近, 且都预测出端部容易因干燥而开裂。上述研究均证实DIC技术对于实木应力应变的检测结果相较于传统游标卡尺线性检测更为精准, 但上述研究对于实木全场应变的分析较弱, 温度讨论缺失。干燥过程中干燥应变变化精准检测、温度对干燥应变变化影响规律的解明, 对于优化干燥工艺、提高干燥质量具有重要意义。

本研究以蒙古栎弦切板锯材为研究对象, 采用DIC技术实时在线监测干燥过程中其端面的应变分布变化规律, 分析其不同干燥阶段宽度、厚度方向干缩应变以及干缩异向差异(其中宽度、厚度方向分别代表锯材弦向、径向), 并研究干燥温度的影响, 为优化蒙古栎锯材干燥工艺提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蒙古栎(*Quercus mongolica*), 产自黑龙江省大兴安岭地区, 50年生, 基本密度为0.603 g/cm³, 锯切成尺寸为200 mm(长度)×100 mm(宽度, 锯材端面弦向)×20 mm(厚度, 锯材端面径向), 初含水率约60%, 无缺陷, 并用保鲜膜包裹后置于冷藏室保鲜备用。

1.2 试验设备

DHS-225型恒温恒湿干燥箱: 温度范围0~150 °C、均匀度±2 °C、波动度±0.5 °C, 湿度RH范围30%~98%, 温度在25~80 °C时, 偏差±2%。

VID-3D非接触全场应变测量系统, 主要包括两个分辨率为2 900万像素、帧率为3~70 fps的立体摄像机, 一个集成发光二极管(LED)光源, 一个三脚架, 一台计算机。将两个摄像头安装在一个水平杆上, 以合适的角度和距离聚焦在试件的端面。在测量过程中, LED灯放置在适当的位置照亮试件。摄像机透过干燥箱玻璃进行实时拍摄。

1.3 试验方法

数字图像相关(DIC)方法是以试验对象物体表面图像的灰度信息为分析基础, 使用先进的计算机视觉彩色图像处理技术, 将试验检测的物体表层变形前后图像的灰度信息进行对比分析, 从而无接触式测量变形前后的全场位移和应变情况。为了使试件表面具有较为明显的灰度梯度特征, 试验前在测试对象被测表面上喷涂白漆和散斑设

置处理,并将表面上这些随机分布的散斑点作为信息传播载体,通过追踪变形前后时间段内散斑图像中形状相同的散斑点,通过相关公式算法计算,最终得出试件表面的变形场。

1.3.1 试件散斑点制作

选取处于相邻位置、材质相近、尺寸相同的锯材进行试验。在测试之前,锯材的测试端面须经过抛光和喷漆处理,以产生随机的黑色散斑图案来提高光学测量的准确性。预试验研究发现,漆膜厚度1 mm时,锯材干燥速率、含水率分布与对照材相比,未出现差异;为得到良好的空间分辨率,喷出的散斑点大小应尽量一致,尺寸大小为5~10个像素(图1b);当散斑点的尺寸小于3个像素(图1c)时会导致无法分析。

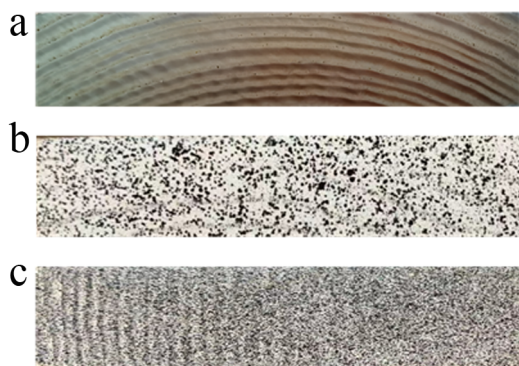


图1 散斑点质量示意

Fig.1 Schematic diagram of scattered spot quality

1.3.2 干燥工艺设置

为讨论不同干燥工艺对干燥应变的影响,本研究选择常规低温(40℃)与中高温(80℃)两组干燥工艺条件。将经上述处理的5块材性及规格相同的锯材(由同一块锯材长度方向截断所得)放入恒温恒湿干燥箱中分别按表1所列工艺进行干燥。其中,1块锯材用于DIC形变检测,1块锯材用于平均含水率检测,3块锯材用于含水率分布检测。为避免玻璃上雾气对拍摄精度的影响,本研究选择相对适中的干燥环境。

表1 干燥试验条件

Tab.1 Drying test conditions

工艺	干球温度/℃	湿球温度/℃	相对湿度/%	平衡含水率/%
工艺1	40	33	61	10
工艺2	80	73	73	10

1.3.3 干燥过程监测

干燥过程中,两台摄像机以2 min和3 min的预设间隔分别采集DIC检测锯材的端面图像,直至锯材含水率达到10%左右。定期取出含水率检测锯材称重计算实时含水率,称重后放回干燥箱原位继续干燥;当含水率检测锯材的含水率分别为60%、20%、10%时(30%含水率时,锯材端面含水率梯度并不明显,效果不理想,因此未检测),取出含水率检测锯材,沿纤维方向截取约20 mm厚含水率分布试片,之后进行端面喷漆,再置于干燥箱原位继续干燥(每组进行3次重复试验)。

含水率分布试片截取方式如图2所示,宽度方向5等分,厚度方向3等分,称量各试片当时质量及烘至绝干后的质量,求取含水率分布,之后将数据输入Origin矩阵工作簿中,通过差分运算得到含水率分布等高线图。采用VIC-3D9分析软件和基于DIC原理的VIC-Snap图像采集软件对图像进行分析处理。

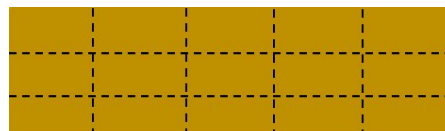


图2 含水率试片分解示意图

Fig.2 Profile of the specimens for the moisture content test

在应变分析中,将锯材端面沿厚度方向均匀划分出五条直线,分别标注为 E_{T0} - E_{T4} (图3a),以此数值代表厚度方向上五个层的应变。

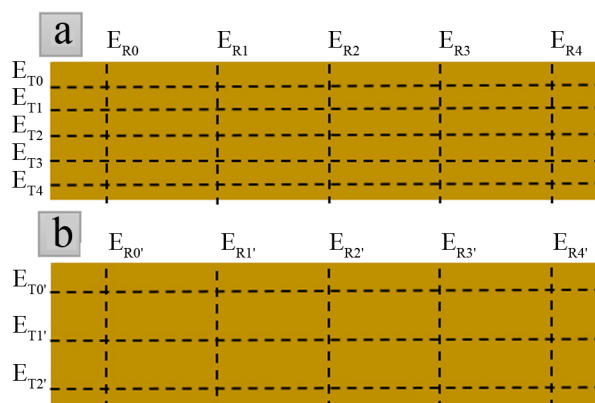


图3 锯材干燥端面应变分布分析区域划分

Fig.3 Analysis area of the dry strain distribution in the cross-section of the testing boards

宽度方向同样均匀划分出五条直线，分别标注为 E_{R0} - E_{R4} ，以此数值代表宽度方向上五个层的应变，分析干燥过程中端面应变分布的变化规律。

锯材在厚度方向上5个层的应变趋势接近，故划分三条直线，分别标注为 E_{T0} - E_{T2} （图3b），从而得出干燥工艺（温度）与锯材干缩异向性之间的联系。

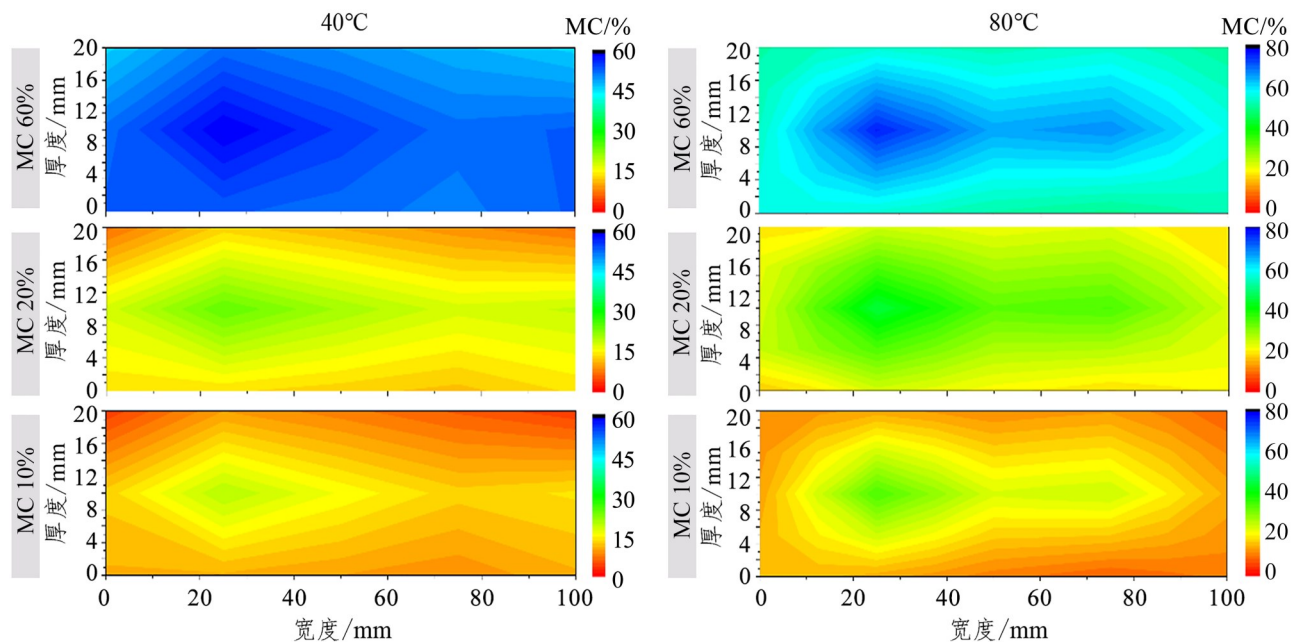


图4 不同干燥阶段的含水率分布

Fig.4 Distribution of moisture contents at different stages of the drying process

不同温度干燥锯材的应变分布结果，见图5和图6。

干燥初期，端面宽度与厚度方向应变值均较小，锯材收缩不明显；随着干燥进行，锯材水分散失，应变分布呈外大内小的规律，平均含水率降到30%、20%、10%时，80℃和40℃时，锯材端面两侧宽度方向应变最大值分别为-0.086、-0.088、-0.093和-0.067、-0.072、-0.074；厚度方向应变最大值分别为-0.077、-0.098、-0.107和0.055、-0.054、-0.054（正、负数值代表锯材膨胀与收缩）。80℃时，中间与两侧之间应变差最大值为-0.059；40℃时，差值仅为-0.042。80℃与40℃的趋势相同，即宽度方向应变值相近，上表层稍大，但应变总体值高于40℃。

造成上述应变规律现象的原因主要与含水率分

2 结果与讨论

2.1 不同干燥温度时锯材端面的含水率与应变分布

不同干燥温度时锯材端面的含水率分布如图4所示。2种干燥工艺下的锯材含水率分布呈现中间高，两侧低的趋势。理论上，含水率分布决定应变分布，但由于木材性质的各向异性，导致应变分布十分复杂。

布有关。干燥初期，高含水率锯材几乎不出现收缩，应变值可以忽略不计。随着干燥的进行，锯材两侧含水率先降至纤维饱和点以下并开始收缩，锯材中间含水率下降速度慢，应变变化较小，所以全场应变呈现两侧大，中间小但分布相对均匀的规律（数值比较接近，整体颜色较一致）。

随着含水率的进一步下降，芯层（端面中心位置定义为芯层、上下表面定义为表层）含水率逐渐达到纤维饱和点以下，开始收缩。此时，导致芯层应变分布不再均匀，并逐渐增大，最大值为0.093。芯层的收缩，缓和了表层长时间受力的状态；到干燥后期，芯层一直处于收缩状态，而表层已收缩完毕，此时芯层的形变较大。而不同温度的影响主要体现在水分下降速率上，最终导致锯材不同层的含水率分布差异增大，增加了应变规律的复杂性。

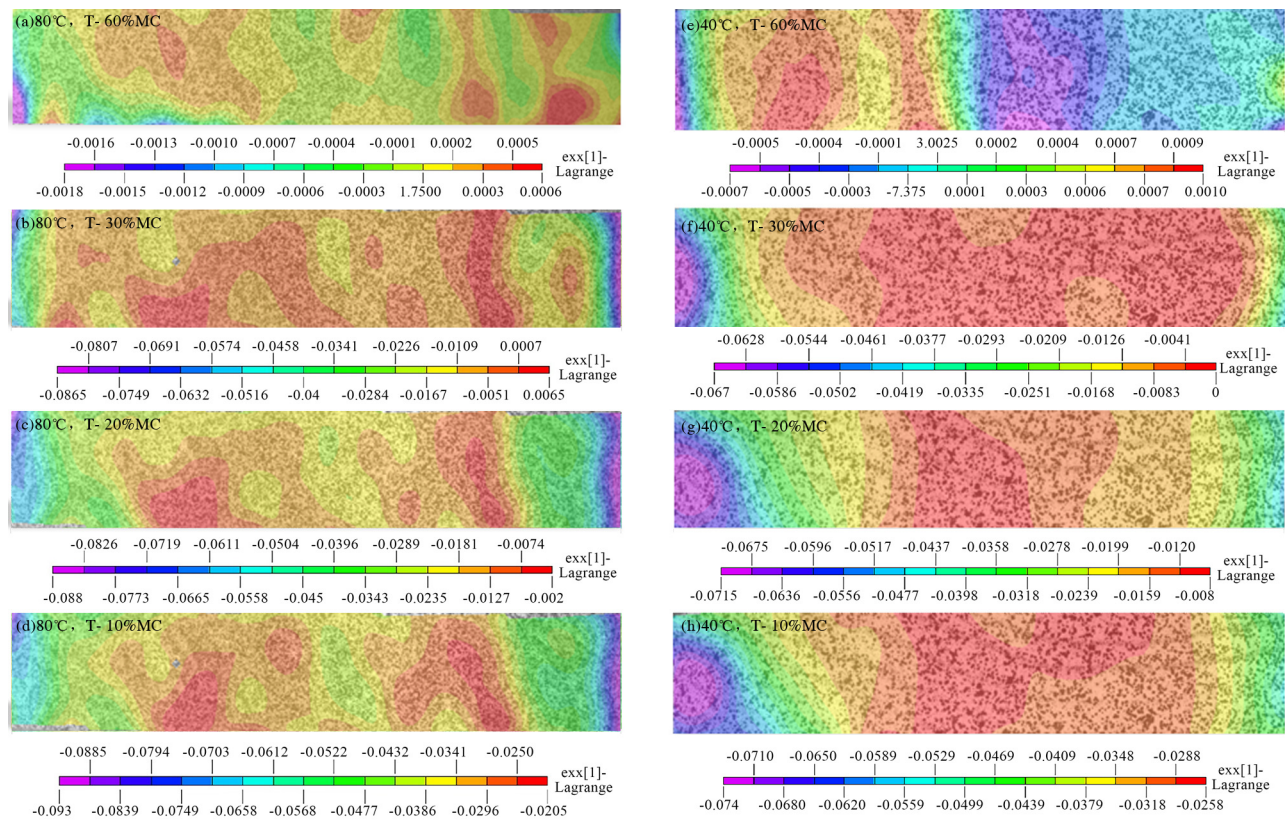


图5 干燥过程中不同阶段的宽度方向应变分布

Fig.5 Strain distribution in width direction at different stages of the drying process

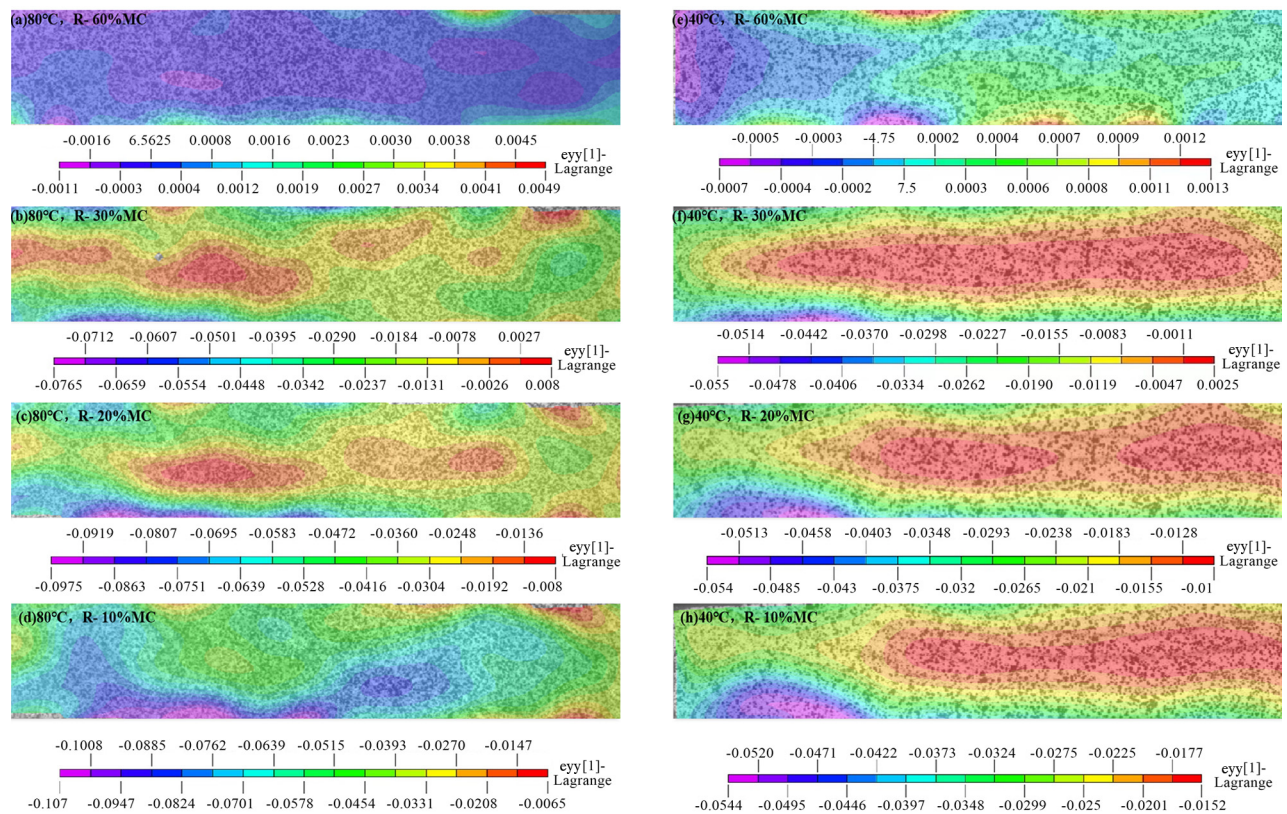


图6 干燥过程中不同阶段的厚度方向应变分布

Fig.6 Strain distribution in thickness direction at different stages of the drying process

总之, 上述 DIC 形变分布规律 (应变两侧大中间小的规律), 与传统干燥应变检测结果相符; 与此同时, 所获非接触、实时的场应变分布信息, 进一步揭示了木材干燥应变规律, 从而可以根据该方法确定芯表层最大应变出现的时机, 为后期进行湿热处理降低干燥应力-应变峰值提供基础, 对优化常规干燥工艺、实现快速高品质干燥具有重要意义。

2.2 干燥温度对锯材端面宽度和厚度方向干燥应变分布的影响

锯材产生应变主要受含水率分布与材性差异的影响。由 2.1 节可知, 锯材端面应变分布十分复杂, 实时、定量分析整个端面应变规律极为困难; 为此, 本研究主要提取端面不同位置进行定量表征及分析。图 7 为不同干燥温度下, 锯材端面上不同部位的宽度、厚度方向应变。

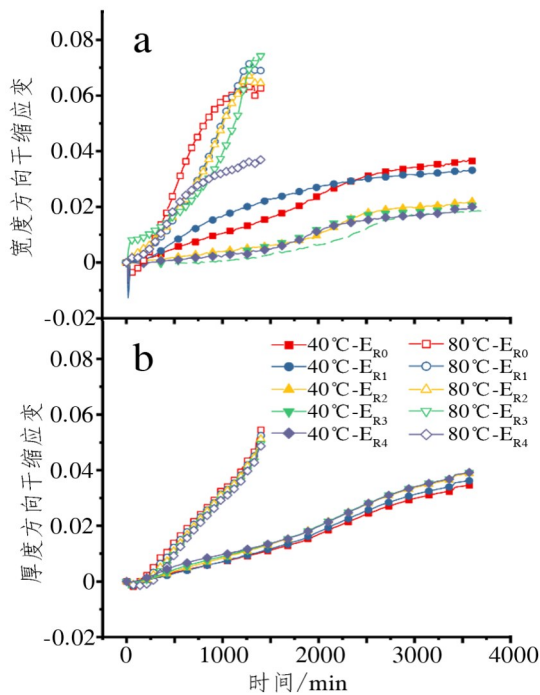


图7 干燥温度对锯材端面宽度和厚度方向干燥应变分布的影响

Fig.7 Effect of drying process on drying strain distribution in the direction of width and thickness of the specimen end face

40 和 80 °C 时, 锯材宽度与厚度的方向应变呈增长趋势。其中厚度方向应变增长趋势相同, 最终趋于一致; 而宽度方向略有差异, E_{T0} 部位应变值一直高于其他部位, 且锯材宽度与厚度方向 80 °C 应变数值一直高于 40 °C。

造成上述现象的原因仍然与含水率变化及材性差异有关。由于木材的弦向干缩明显高于径向 (2:1), 导致锯材沿宽度方向的变化规律较为复杂, 不同层间的宽度方向差异随含水率变化波动较大; 与之相对的各层厚度方向干缩应变差异较小, 各层变化较一致。

而温度的影响主要体现在含水率下降速率上。温度导致了表芯层含水率差异增加, 因此, 增加了宽度与厚度方向的应变数值。仔细观察发现, 在温度的影响下, 在 80 °C 时表层 (E_{T0}) 的应变数值, 明显高于其他层; 40 °C 时的变化与其他层变化相近。而 E_{T0} 与 E_{T4} 、 E_{T1} 与 E_{T3} 应变数据有差异, 原因可能与木材结构差异有关。

木材结构呈非均质性与各向异性的特点, 虽然上述位置在端面呈对称性分布 (理论上形变受水分变化影响相同), 但所处木材位置不同 (即靠髓心位置不同), 为此, 导致形变随含水率变化时, 出现一定差异。

2.3 干燥温度对厚度与宽度方向的应变差异影响

图 8 为锯材宽度、厚度方向干缩率比值。

由图 8 可知, 干燥前期 (小于 600 min), E_{T0} 的波动范围, 40 °C 时在 -12~12 内, 80 °C 时在 -5~3 内; E_{T1} 的波动范围, 40 °C 时在 -10~12, 80 °C 时在 -2~2; E_{T2} 的波动范围, 40 °C 时在 -5~8, 80 °C 时在 -4~4; 随着干燥的进行, 干缩差异波动逐渐缩小, 但仍呈增长趋势。干燥后期 (大于 600 min), 40 °C 时, E_{T0} 、 E_{T1} 、 E_{T2} 波动范围都在 0.8~1.2 内, 几近相同; 80 °C 时, 波动范围在 0.6~0.8 内, 仍有上升趋势。分析表明宽度方向不同部位存在干缩异向性差异, 这也是导致锯材干燥前期出现开裂的主要原因。

3 结论

1) 在本试验条件内, 80 °C 干燥锯材的形变较大, 随着干燥的进行, 锯材沿厚度与宽度方向各层应变逐渐增大; 锯材厚度方向应变增长趋势相近, 锯材干缩异向性的差异主要来自于锯材宽度方向 (弦向)。锯材干燥端面应变分布十分复杂, 但整体变化趋势主要受含水率分布及变化的影响; 即表层含水率下降速率较快, 形变变化较大。

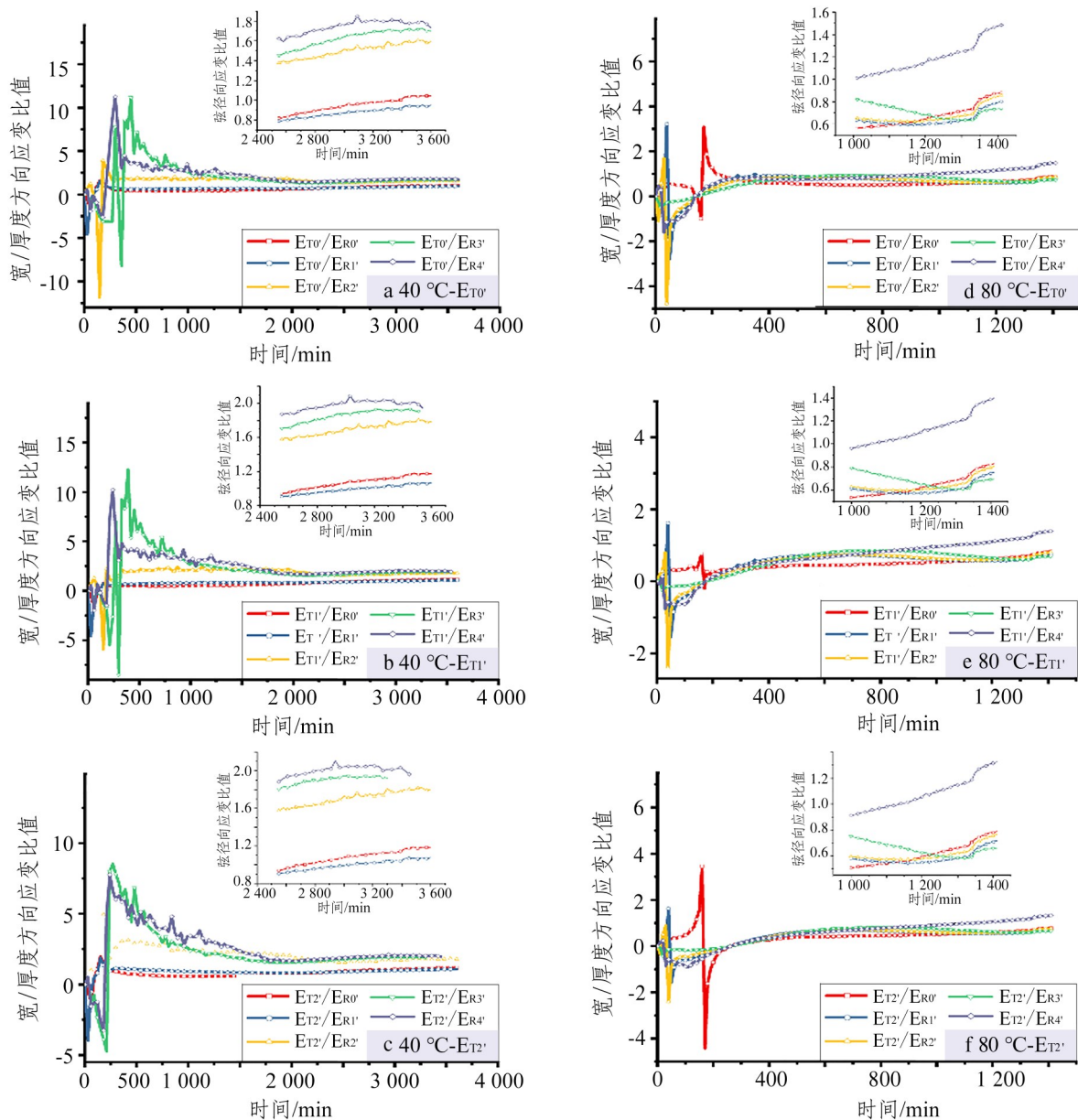


图8 锯材宽度、厚度方向干缩率比值

Fig.8 Shrinkage in the width and thickness direction of *Quercus mongolica* wood panels

2) DIC技术是非接触式检测木材干燥应变的有效手段,可将干燥形变过程可视化并获得精确的结果,形变分布与传统检测手段结果相符。可利用该技术检测温、湿度变化的非恒定干燥基准下的应变行为;在此基础上根据干燥应变变化规律,即时调整温、湿度参数以降低应力-应变峰值,进而优化干燥工艺,提高干燥质量。

参考文献:

[1] 李维桔. 木材弹性及木材干燥应力——II、木材干燥应力[J]. 南京林

业大学学报(自然科学版), 1983(2): 107-122.

- [2] FU Z, ZHAO J, HUAN S, et al. The variation of tangential rheological properties caused by shrinkage anisotropy and moisture content gradient in white birch disks[J]. *Holzforschung*, 2015, 69(5): 573-579.
- [3] Mcmillen J M. Dry stresses in red oak[J]. *Forest Product Journal*, 1958, 5(1):71-76.
- [4] 蒋佳荔, 吕建雄. 木材干燥应力的研究方法与发展[J]. *木材工业*, 2005, 19(2): 4-7, 16.
JIANG J L, LU J X. Review of research methods for wood drying stresses[J]. *China Wood Industry*, 2005, 19(2): 4-7, 16.
- [5] 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.
- [6] Khoo S W, Karuppanan S, Tan C S. A review of surface deformation

(下转第95页)