

木材干燥应力的研究方法与发展

蒋佳荔, 吕建雄

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 木材干燥应力的研究对丰富和完善木材干燥理论、建立和完善干燥工艺、提高干燥质量和经济效益具有重要意义,许多研究者从不同角度对木材干燥应力应变进行了试验测定及数值计算。本文对其中的主要研究方法进行了较详细的归纳,并对今后的研究提出了看法和建议。

关键词: 木材干燥; 干燥应力

中图分类号: TS652 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2005)02-0004-04

Review of Research Methods for Wood Drying Stresses

JIANG Jia-li, LU Jian-xiong

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

Abstract: Studies on wood drying stresses are very helpful to further the science of wood drying, establish suitable kiln schedules and improve the quality and economics of the wood drying process. Many scientists have studied different aspects in the field of drying stresses and developed numerical calculations for their results. This paper reviewed and summarized the typical study methods and made some comments and suggestions for further studies.

Key words: Wood drying; Drying stresses

木材的干燥应力会引起诸如开裂、扭曲和表面硬化等干燥缺陷。研究干燥应力的产生及发展变化情况,建立木材发生缺陷的临界条件,进而通过控制干燥条件,在保证干燥质量的前提下使木材能快速干燥,提高干燥的经济效益,一直是世界各国木材学者们的研究热点。众多学者采用不同的方法对干燥应力应变进行试验测定或数学计算,但迄今为止尚无一种方法能直接、全面、准确地测量干燥应力,所用的方法均是通过应变间接推测或计算干燥应力值。本文在归纳了几种研究木材干燥应力的方法基础上,试图为今后更深入地探索干燥应力的产生、发展及其控制机理提供一些基础和参考。

1 木材干燥应力的成因及发展模式

收稿日期: 2004-06-04; 修改稿: 2004-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助课题之一(30271053)。

作者简介: 蒋佳荔(1981—),女,中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

通讯作者: 吕建雄(1963—),男,中国林科院木材工业研究所副所长,研究员,博士生导师。

干燥过程中木材应力分为:含水率梯度引起的应力和木材构造的各向异性导致干缩差异所引起的应力。木材干燥通常只考虑含水率梯度引起的干燥应力。

McMillen^[1]对干燥过程中木材厚度方向上应力的发展过程进行了较详细的定性研究,提出了干燥应力的发展模式:干燥初期,木材表层含水率低于纤维饱和点而首先发生干缩,受到高含水率、没有发生干缩的内层区域的限制而产生拉伸应力,内层区域则产生压缩应力;随着干燥的进行,木材内层区域含水率降低并开始干缩,外层区域发生永久性的塑性拉伸变形,限制了内层区域的进一步收缩,因此,内层区域由压缩应力变拉伸应力,外层区域由拉伸应力变压缩应力,完成应力转变。Haque^[2]在 McMillen 提出的干燥应力发展模式上进一步研究和完善了干燥应力的特征,将干燥过程的各种应变归纳为:总应变=弹性应变+蠕变应变+自由干缩应变+机械吸湿应变+热应变。这些应变可分为3类:瞬时发生(弹性应变);随着时间而发展(蠕变应变,热应变);取决于含水率变化速率(自由干缩应变,机械吸湿应变)。

2 几种干燥应力的研究方法

2.1 叉齿试验法

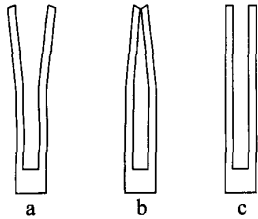


图 1 三叉齿试验的变形发展

Fig. 1 Three prong test showing the development of stresses during wood drying

叉齿试验法是将处于不同干燥阶段的木材试件取出,锯成三个叉齿(如图 1 所示),根据叉齿的变形情况判断干燥应力。干燥初期叉齿将呈图 a 式变形,木材表层产生拉应力。完成干燥的木材呈图 b 式变形,木材表层产生压应力。木材干燥后若获得适当的调湿处理,叉齿将变直,呈图 c 状。

与三叉齿相比,将干燥的木材试材锯成十个叉齿能更好地描述干燥应力的变化。在干燥的不同阶段取出木材试件,切开叉齿,在每个叉齿不发生弯曲变形的情况下,其长度的变化表示该区域木材的弹性应变值。干燥初期阶段,木材发生干缩,试材整体尺寸(实线部分)会变小(虚线部分),如图 2。叉齿被切开后如果受到拉应力则变短,如果受到压应力则变长。

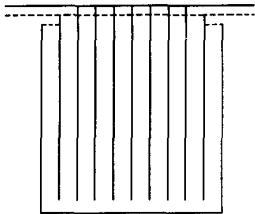


图 2 干燥初期十叉齿试验的变形

Fig. 2 Ten prongs test showing the drying stresses in the early stages of wood drying

2.2 切片法

切片法由 McMillen^[1]提出并应用,其原理是根据在弹性范围内木材应力和应变成正比的关系,通过测量木材干燥应力检验板切下的木薄片的瞬间尺寸变化来确定干燥应力的分布情况。具体方法如下:

将干燥应力检验板按图 3 要求划线并编号。在干燥过程的任一阶段锯下薄片之前,用测微计测量每一薄片的长度。沿厚度方向划线处切下薄片后,再次测量,前后两次测量之差即为弹性应变。

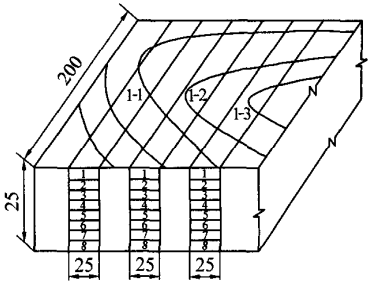


图 3 切片法试件制作示意图

Fig. 3 Slicing test specimens preparation

Youngs^[3]运用切片法研究了在热与载荷作用下,红栎的强度、弹性和流变性能与干燥温度、含水率、时间的关系。木材干燥过程并不是一个瞬时过程,干燥时间受到干燥条件(介质温度、相对湿度、气流速度等)和木材内水分移动能力的影响。干燥时间对木材性质的影响主要表现为引起热应变以及蠕变和应力松弛。蠕变和应力松弛反过来影响木材的干缩和塑性变形,进而影响干燥过程中应力的发展。

切片法能成功地定性描述木材的干燥应力,但测试方法繁琐,精确性不够。另外,切片法对干燥应力的测量有一定间隔,故不能实现在线实时控制。

2.3 瓦弯法

日本学者 Shigeru Nishio^[4]提出了用瓦弯法连续地测定干燥应力,试件制备如图 4 所示。从弦切板或径切板上截下 200 mm×30 mm 的试件,在厚度方向上从中间一分为二,除表面外,其余五个面用铝箔进行密封,将表面朝上放置。在干燥过程中,试件在长度方向上发生弯曲,其矢高变化 h 可表征干燥应力引起的应变量。表面向内弯曲表明受到拉伸应力,表面向外弯曲表明受到压缩应力。

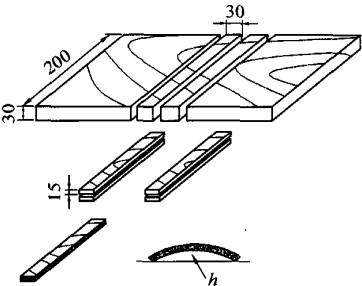


图 4 瓦弯试件制作及瓦弯量测定

Fig. 4 Preparation of cup sample and definition of cup quantity

高建民等^[5]在瓦弯法的基础上提出了木材干燥应力连续监测方法并设计了试验装置。该方法采用

涡流传感器对干燥过程中瓦弯试件的矢高进行连续测试,通过计算机自动采集、存储数据,实现干燥应力的自动、连续监测。

比较瓦弯法与切片法可发现,瓦弯试件的变形与切片法描述的表层应力变化情况相似,但瓦弯法试件的变形滞后于用切片法描述的表层应力的发展,变形受到树种和材料(径切板/弦切板)因素的影响;干燥初期阶段,瓦弯试件的干缩应力受到试件内部区域的限制,瓦弯量不能达到最大值。瓦弯法能简易、连续地描述木材表层应力的发展变化,通过考察在不同的干燥温度和相对湿度情况下,瓦弯量与发生表裂的关系,对避免干燥过程中表裂的发生有指导作用,但对木材内层应力的变化描述却力不从心。

2.4 声发射法

木材干燥过程中发生干缩,与应力共同作用形成微小的裂纹,发出 AE 信号。利用木材应力与 AE 波形的关系,经过分离检验确定应力的 大小,是目前唯一能实现与控制仪器联合使用的技术。早在 1980 年 Skaar^[6]就考察了利用声发射(AE)对干燥过程应力发展过程进行监控的可能性,目标是建立一个干燥室实时控制系统。从此,众多学者致力于声发射法的研究工作。

Sadanari^[7]测定了不同树种在不同干燥条件下 AE 信号的波形、频率域、二相平衡值和最大振幅,研究了干燥过程中木材发生开裂与 AE 信号之间的关系,发现:当 AE 信号频率较低而振幅较大时,预示着木材开裂即将发生;AE 信号的频率低于 100 kHz 时将发生开裂。测量 AE 信号的传感器的频率至少为 700 kHz。

Nogichi^[8]对栎木(*Quercus crispula*)、水青冈(*Fagus crenata*)、东北白桦(*Betula mandshurica*)3 种阔叶树材干燥过程中的 AE 信号进行了研究。提出:AE 信号属于突发型信号,较容易发生开裂的栎木的 AE 信号较水青冈、东北白桦的发生率高;同一干燥条件下,环境湿度变化对 AE 发生率的影响较试材内部含水率变化的影响大。湿度降低能促进 AE 的发生,湿度升高能抑制 AE 的发生;温度对 AE 发生率的影响不大;AE 信号分布于低频区域,其原因可能是木材的杨氏模量较小的缘故。

Stephen^[9]以时间域为参数,运用 AET 系统对厚度为 25 mm 和 50 mm 的加洲黑栎(*Quercus kelloggii*)干燥过程中的 AE 信号进行了监测。干燥时干球温度为 82℃、湿球温度为 43℃,研究表明:高振幅峰值与表裂的发生关系密切,低振幅峰值是微裂

纹等缺陷产生的前兆,将导致可视的开裂。在低振幅峰值与可视开裂形成之间有一个滞后的时间差。

由于传感器只能缚在木材表面,声发射法主要用于干燥过程中木材表裂的监测。木材内部产生的 AE 信号无法测得,所以无法监测木材的内裂、蜂窝裂和皱缩等缺陷。研究主要集中在 AE 信号的特征与木材干燥过程中缺陷的发展关系上,AE 技术应用于木材干燥工艺的监控也处于研究阶段。

2.5 差异干缩法

Stohr^[10]提出了一种连续、无损测量木材干燥应变的新方法。该方法基于一个假设:在相同的干燥条件下,弦切板由干燥应力引起的干缩随着木板弦向宽度的减少而减小。干燥过程中,如果木材受拉伸干燥应力,试材的尺寸比正常干缩的试材尺寸大;如果受压缩干燥应力,则试材的尺寸比正常干缩的试材尺寸小(图 5)。因此,可以用应力作用下的干缩与正常干缩之间的差值来表征木材发生应变的程度,即应变=在应力条件下发生的干缩-正常干缩,应变>0,则表明受到拉应力;反之,受压应力。在弦向宽度减小到一定尺寸时,木材的干缩只有正常干缩,应变可通过测量被干材宽度方向的干缩量与正常干缩的差值求得。Stohr 将不同宽度的木材在低温条件下进行干燥,测量表层、中间层和心层的干缩量并进行对比,证明了该假设的可行性。

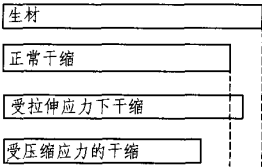


图 5 基于干燥应力的干缩图示说明
Fig. 5 Illustration of shrinkage as affected by drying stress

2.6 数学模型法

Kawai^[11,12]运用木材的粘弹性与各向异性的应力-应变关系描述木材的流变行为,通过建立 3 个参数(即基本干缩、实际干缩和非弹性应变)作为木材干燥应力的函数来计算干燥应力。基本干缩产生于木材细胞壁失水,在低于纤维饱和点下,基本干缩量与含水率之间是线性关系;实际干缩的数据从给定干燥条件的试验中获取;非弹性应变通过粘弹性关系求得。由于该方法是建立在线性理论的基础上,构成方程在程序中是以微小增量的形式进行描述,因此,只有在线性增加、木材未被破裂的条件下才适用。通过计算干燥应力表明,这种方法能描述应力转变的一般

模式;表层的拉伸应力发展很快,并在干燥初期阶段达到最大值,干燥应力值的大小取决于干燥过程中的相对湿度,同时,相对湿度是决定含水率分布的主要因素;干燥初期木材表层的含水率梯度对整个干燥过程应力的发展起着决定性作用。

Ugolev^[13]提出用数学模型计算木材干燥过程和润湿过程的应力值及总的残余应变,即恒定应变(包括纯粹的残余应变和冰冻应变),考察以应力应变作为干燥过程中木材应力状态参数的可能性。模型基于不同温度、湿度及载荷条件下木材发生变形的基本理论:①木材在恒温、恒含水率情况下加载和卸载的应力、应变关系;②不同温度条件下木材垂直纹理方向的弹性模量与含水率的关系;③干燥过程中不同含水率阶段加载和卸载条件下的应力、应变关系;④木材加湿过程中不同含水率阶段加载与卸载条件下的应力、应变关系,在此基础上建立一个构成公式。

Haque^[2]在温度为20~140℃、含水率为5%,15%和20%条件下对辐射松(*Pinus radiata*)边材进行干燥,将试验数据与4种不同的理论模型值进行对比,求得上述模型对试验数据的参数值和标准差,比较哪种模型能更贴切地描述干燥过程中粘弹性应变关系。结果表明,Maxwell模型只有一个参数,与试验数据的拟合度不高;Bailey-Norton公式是一个力学模型,只能定性描述蠕变变量随着时间不断增加的关系,而不能定量地给出蠕变变量的值,在大多数情况下也不适合。从不同温度和平衡含水率情况下蠕变的试验值/模型值与时间的关系曲线比较看,3参数的Burgers模型和2参数的Kelvin模型与试验数据的拟合度较高。

Sokolovskyy^[14]建立了物理-数学模型模拟和分析木材干燥过程中的流变行为,考察了随时间发展的应变发生发展机理,干燥应力与木材内外部的热质传递、木材构造各向异性之间的关系。

此外,有限元法(FEM)是一种近似求解一般连续域问题的数值方法,已广泛应用于结构分析,近年来在木材研究领域中也已得到应用。将整个材料划分为有限个小的单元,每个单元有不同的性质,如早晚材之间存在着明显的材性差异,运用有限元法求解单元内应力,可得到一个精确合理的解。Morgan^[15]运用有限元的方法分析木材的干燥应力,成功地模拟了木材干燥应力转变现象。Cui^[16]等利用有限元法分析了木材干燥过程中传热传质的动态变化。Dahlblom^[17]建立了三维有限元计算机模型,对含水率变化条件下的木材变形量进行模拟。

上述数学模型法中的各种方法均是基于不同的

假设、对诸多影响因子进行简化而获得,目前每一种模型对干燥应力的模拟只能侧重于某一方面,或是对干缩应力进行描述,或是对干燥过程的应力转变进行模拟,亦或是对残余应变进行模拟等。

3 今后研究方向的展望与建议

木材干燥过程是一个非常复杂的物理过程,主要表现在:干燥过程中的传质传热及动量传递;由于干缩引起的应力和变形是非常复杂的力学行为;干燥过程有很大的变异性,包括树种间、心边材间、弦切板和径切板间、板中节子、年轮及应力木等,由此决定了干燥应力的产生和发展也是非常复杂的。

从上述几种研究木材干燥应力的几种研究方法来看,数学模型方法有着十分重要的意义,其优点在于:模型对干燥参数的变化能做出灵敏反应,对数据能快速进行分析计算;解析方法在不同的树种间具有一般性;能够分析木材、水分和温度的相互关系。

鉴于干燥应力的复杂性,涉及的因子很多,建立一个能全面准确地模拟干燥应力的数学模型还是困难重重,必须基于:①干燥过程伴随热量与水分传递,能量的贮存和耗散以及各种应力、应变的产生,深入研究温度、含水率及弹性模量之间的关系;②物理力学公式的构建及自由变量个数的选取;③解答模型的解析方法和数学方法及空间向量个数的选取。此外,瓦弯法的优势在于其能够对木材干燥过程中发生的变形进行无损实时监控,能够定性和定量地收集包括含水率梯度、干缩系数、迟滞的力学行为以及应力回复等信息,应依此原理,致力于设计新的试验装置和手段,探寻揭示木材干燥过程中内部应力的发展模式以及应力应变关系的新途径。

木材干燥过程是一个传质传热的过程,而木材本身的多孔性及各向异性的特点决定了这一过程的复杂性,因此,加强与木材干燥应力相关学科领域的基础研究具有重要意义。木材干燥的快慢决定于木材内的传热传质速率,其中木材细胞壁内吸着水的传递又是干燥应力发生、发展的直接推动势,全面系统地研究不同干燥方法和不同干燥条件下木材内的传热传质规律、水分传递的途径和机理及其与干燥应力的发展关系非常必要。此外,影响干燥应力的因子很多,如瞬时发展的弹性应变、以时间为函数的蠕变应变、以温度为函数的热应变,以及取决于含水率变化速率的自由干缩应变和机械吸湿应变等,对各个因子的研究应该加强和深入。

(下转第16页)

2) 不锈钢纤维的加入可以显著提高复合中纤板的电磁屏蔽效能,且随不锈钢纤维施加比率的增加呈显著上升,但上升的幅度有所差别。当施加比率为3(即不锈钢纤维重量占整个板重的13.3%,以板厚度9 mm计)时,双侧表面复合不锈钢纤维中纤板的屏蔽效能可达55 dB以上,单侧表面复合板材屏蔽效能也能达到40 dB以上。

当复合板中不锈钢纤维的含量达到一定程度时,双侧表面复合的板材的屏蔽效能高于单侧表面集中复合的板材。

参考文献:

- [1] 陈穷. 电磁兼容性工程设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 525-566.
- [2] 朱家琪, 罗朝晖, 黄泽恩. 金属网与木单板的复合[J]. 木材工业, 2001, 15(2): 5-7.
- [3] 长泽长八郎. 赋予木质材料电磁屏蔽性能[J]. 木材工业(日),

1996, 51(5): 188-193.

- [4] 富村洋一. Manufacture of Medium Density Fiberboard Containing Carbon Fibers in the Core Layer[J]. 木材学会誌, 1987, 33(8): 645-649.
- [5] ALAN L. LAMBUTH. Electrically Conductive Particleboard[C]. Proceeding of the 23rd International Particleboard/Composite Material Symposium. Pullman, WA: Washington State University, 1989: 117-128.
- [6] 加藤昭四郎等. Production of Multi-laminated Wood Composites and its Electromagnetic Shielding Effectiveness and Some Other Properties[J]. Bull For & For Prod Res Inst, 1991, 360.
- [7] 长泽长八郎等. Effects of Wood Species on Electro-conductivity and Electromagnetic Shielding Properties of the Electrolessly Plated Sliced Veneer with Nickel[J]. 木材学会誌, 1994, 40(10): 1092-1099.
- [8] 王锦成. 电磁屏蔽材料的屏蔽原理及研究现状[J]. 化工新型材料, 2002(7): 16-19.
- [9] 张显权, 刘一星. 木材纤维-铜丝网复合 MDF 的研究[J]. 林产工业, 2004, 31(5): 15-19.

(责任编辑 姜征)

(上接第7页)

参考文献:

- [1] McMillen J M. Stresses in Wood during Drying[R]. U S Forest Product Laboratory, Report No. 1652, 1958.
- [2] Haque M N, T A G Langrish, L-B Keep, et al. Model Fitting for Visco-elastic Creep of Pinus radiata during Kiln Drying[J]. Wood Science and Technology, 2000, 34: 447-457.
- [3] Youngs R L, C B Norris. New Method of Calculating Internal Stresses in Wood[J]. Forest Products Journal, 1959, 9(10): 367-371.
- [4] Shigeru Nishio. Estimation of Drying Stresses in Wood by Cup Method. II Comparison of Cup Method with Slice Method[J]. 木材学会誌, 1976, 22(11): 626-631.
- [5] 高建民, 余雁, 刘志军. 木材干燥应力连续检测方法的研究[J]. 木材工业, 2004, 18(3): 1-3.
- [6] Skaar C, W T Simpson, R M Honeycutt. Use of Acoustic Emissions to Identify High Levels of Stress during oak lumber drying[J]. Forest Products Journal, 1980, 30(2): 21-22.
- [7] Sadanari M, S Kitayama. Waveform Analysis of Acoustic Emissions Generated in the Wood Drying Process[J]. 木材学会誌, 1989, 35(7): 602-608.
- [8] Noguchi M, S Okumura, S Kawamoto. Characteristics of Acoustic Emissions during Wood Drying[J]. 木材学会誌, 1985, 31(3): 171-175.
- [9] Quales S L. Acoustic Emissions Associated with Oak During Drying[J]. Wood and Fiber Science, 1992, 24(1): 2-12.

- [10] Stohr H P. Shrinkage Differential as a Measure for Drying Stress Determination[J]. Wood Science and Technology, 1988(22): 121-128.
- [11] Kawai S, K Nakato, T Sadoh. Computation of Drying Stresses Resulting from Moisture Gradients in Wood during Drying I [J]. 木材学会誌, 1979, 25(2): 103-110.
- [12] Kawai S, K Nakato, T Sadoh. Computation of Drying Stresses Resulting from Moisture Gradients in Wood during Drying II [J]. 木材学会誌, 1979, 25(4): 272-279.
- [13] Ugolev B N, N V Skuratov. Stress-strain State of Wood at Kiln Drying[J]. Wood Science Tech, 1992, 26: 209-217.
- [14] Sokolovskyy Y. Stresses and Strains of Wood in the Drying Process[R]. 8th International IUFRO Wood Drying Conference, 2003.
- [15] Morgan K, H R Thomas, R W Lewis. Numerical Modeling of Stress Reversal in Timber Drying[J]. Wood Science, 1982, 15(2): 139-149.
- [16] Cui Y Q, E W Jones, F W Taylor, et al. An Application of Finite Element Analysis to Wood Drying[J]. Wood and Fiber Science, 1994, 26(2): 281-293.
- [17] Dahlblom O, H Petersson, S Ormarsson. Full 3-D FEM-Simulations of Drying Distortions in Spruce Boards Based on Experimental Studies [R]. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, 2001.

(责任编辑 袁东岩)

欢迎赐稿、发布信息、刊登广告