

# 木材干燥应力连续监测方法研究

高建民\*，余雁，刘志军

(北京林业大学森林工业学院，北京 100083)

**摘要：**本文在卡普法的基础上，提出了具有实用意义的木材干燥应力连续监测方法，并设计了所需的配套装置。该方法采用涡流传感器对干燥过程卡普片的矢高进行连续测试，同时通过计算机自动地采集、存储数据，具有装置结构简单、测量原理可靠、操作方便等特点，对其进一步改善后，有望用于干燥实践。

**关键词：**木材干燥、干燥应力、连续监测、卡普法、涡流传感器

## The Method for Wood Drying Stress Continuous Determination

Gao Jianmin , Yu Yan , Liu Zhijun

(College of Forest Products and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** On the basis of Cupping Method, a new method for wood drying stress continuous determination is presented. Eddy current sensor is used to continuously measure the deflection of Cupping Slice, and a corresponding device is designed. According to the data acquired, it is concluded that eddy current sensor that is combined with a computer employed to collect and store all the data automatically, can successfully perform deflection determination on a continuous basis. That means continuous determination of drying stress during the drying process is really realized. Furthermore, this device owns the hope to be employed in the wood drying practice as long as some improvements are made.

**Key Words:** wood drying, drying stress, continuous determination, cupping method, eddy current sensor

以最少的时间和能耗干燥出质量优异的木材是木材干燥学研究的最终目的。在研究和干燥实践中，人们发现干燥质量和干燥速度是一对难以克服的矛盾，干燥速度越快，木材发生质量降等的可能性越大。因此，如何在干燥质量与干燥速度之间寻找最佳的平衡点一直是木材干燥学的研究热点。可以说，几乎所有干燥机理和工艺方面的研究都是以此为最终目的。

寻找干燥质量与干燥速度之间最佳平衡点实质上就是探求最优的干燥工艺。目前，一般是通过百度试验法来确定。这种方法需要先在实验室对特定基准树种进行大量试验，

得到它的粗略干燥基准,然后在干燥实践中对其进一步修正和完善。这样得到的干燥基准有其科学依据,但不一定是最优的。而且不同的木材具有不同的干燥特性,甚至同一树种由于产地等条件的不同,其干燥特性也不尽相同。为了保证干燥质量,就得分别确定它们的干燥基准,这是一项繁重的工作,需要做大量的试验,并在干燥实践中以损失的代价逐步对之加以完善。基于以上原因,人们期待一种能够简便、快速确定任一树种最佳干燥工艺的方法。

通过大量的研究<sup>[1,2,3,4,5]</sup>人们发现当干燥过程木材内部产生的应力超过了木材的横纹抗拉强度时,木材就会出现表裂、内裂等干燥缺陷。其中表裂是由干燥初期木材表层的拉伸应力造成的,而干燥后期芯层拉应力则是促使木材发生内裂的直接原因。虽然用缓慢的速度干燥能使木材内产生的应力较小,但这必然会延长干燥时间,降低干燥效率。而用危险干燥应力作为控制干燥速度的参数,便可在保证质量的前提下最大限度的提高干燥速度,从而获得最佳的干燥效益。为了实现这个目的,需要能连续监测木材干燥应力的方法。

目前国内外对干燥应力连续监测方法的研究极少,国内只有一篇关于这方面研究的报道<sup>[6]</sup>。笔者通过分析大量的文献认为,对卡普片在干燥过程的弯曲变形进行连续监测是目前实现干燥应力连续监测的一条可行途径。本次研究就是在这方面所做出的初步尝试。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

本次研究所采用的树种为椴木,试材取自北京木材厂。规格为750×202×40(mm),纹理通直,没有明显的缺陷。板材经四面刨光后尺寸为748×200×39(mm),用塑料薄膜仔细包好,存于冰柜待用。

### 1.2 试片制备

卡普试片的制作参照西尾茂<sup>[7]</sup>所提出的制作方法,具体制作流程如下:

(1)选择一块刨光好的试材,从端头锯除10cm,然后沿着木材纤维方向连续距取宽为3cm的长条形木块,直到距试材另一端约10cm为止。

(2)沿着木块厚度方向的中性面将其等分为厚度相等的两小试片。小试片的尺寸规格为200\*30\*19(mm),为防止干燥,小试片应立即装入袋口可密封的聚乙烯树脂薄膜袋中。

(3)将铝箔纸裁成所需要的尺寸,涂上402胶,贴在除原板表面的五个面上。将制成的试验上记号,装入袋口可密封小塑料袋中,放入冰箱中待用。

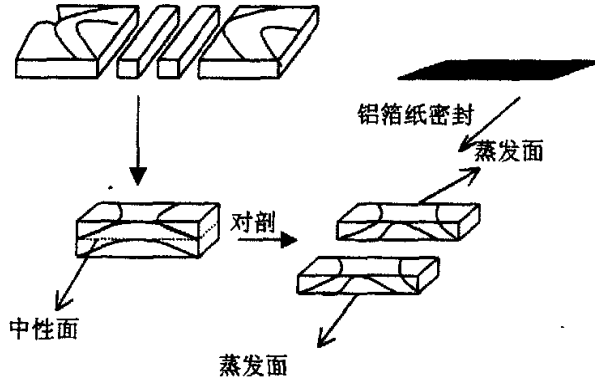


图1 卡普试片制作流程图

Figure1 The flow diagram of manufacturing Cupping Slice

(4)干燥过程卡普片的变形如图2所示。

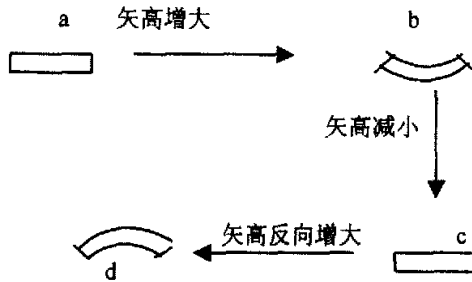
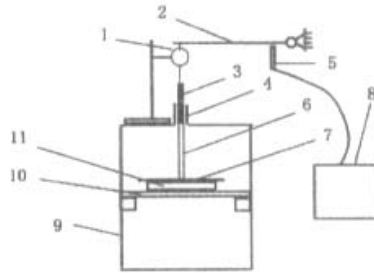


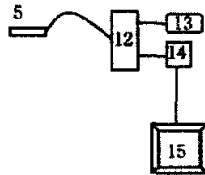
图2 干燥过程卡普片的变形图

Figure2 The deflection of Cupping Slice in drying process

### 1.3 测量装置的制作



- 1.百分表 2.校准装置 3.接触杆 4.导轨  
5.传感器 6.传动杆 7.横架杆 8.信号接收系统  
9.干燥箱 10.垫板 11.卡普片



12. 前置放大器 13. 直流稳压电源  
14. H. P. 3455A数字毫伏表 15. PC机

图3 干燥应力连续监测装置示意图

Figure3 the device for wood drying continuous determination

#### 装置的说明:

**垫板:**干燥箱的网垫柔性大,若把卡普片直接放在上面,其受力弯曲时会对网垫施加一个向下的力而使网垫变形,百分表就不能正确的显示出矢高的大小,因此需要在网垫上架一个垫板。垫板为一厚10mm、宽60mm、长365mm的钢板,具有良好的刚性。

**横架杆:**横架杆为一直径约2mm,长约220mm的钢制圆柱形长杆。其直径既不能太大,也不能太小。太大会影响表面水分的蒸发,太小则其刚性不足,受力会产生过大的弯曲变形,加大测量误差。

**传动杆:**传动杆为外径3.4mm,壁厚约0.3mm的空心铜管。使用空心管的目的是尽量减小施加在卡普片上的外力,以避免产生过大的误差。传动杆与横架杆之间通过接头垂直连接,它们之间可灵活装卸。

**接触杆:**接触杆为实心的铝制圆柱形长杆,其上端面与百分表的测量头点接触连接。接触杆与传动杆之间形成过度配合。

**导轨:**导轨的作用是保持接触杆的垂直运动。其内径约比接触杆的直径大0.5mm。

如果两者相差太大，不能保证传动杆在上下运动时不发生偏斜，太小则会增大滑动摩擦力。为了尽量减小摩擦，要求导轨的内表面光滑平整。

百分表：卡普片的矢高变化也可通过百分表读出，百分表的测量范围为 0~30mm，精确度为 0.01mm。装置中使用百分表的主要目的是便于确定输出电压与位移量之间的标定曲线。

前置放大器：为涡流传感器提供高频电流，并把位移信号转换为电信号，放大输出。

直流稳压电源：为前置放大器提供 24 伏直流电压

数字毫伏表：显示传感器的输出电压。它不仅可以用于测量直流或交流电压，还可以用于测量电阻。该设备设有自动校准功能，可以自动调整测量数据的增益或残余误差。

铰链装置：由于实验中所用的涡流位移传感器的测量范围为 0~2mm，而卡普片在干燥过程的最大矢高一般都大于 6mm，超出了传感器的测量范围，因此特设计了一个铰链装置，利用它把大位移转化为传感器量程范围内的小位移。与铰链相连的是一个长 330mm，宽 21mm，厚 1.5mm 的不锈钢条，相当于电涡流传感器系统中的金属导体。

PC 机：配备有 GPIB(General Purpose Interface Board)数据采集板，用于定时采集输入到计算机的数据。

#### 1.4 试验方法

待干燥介质稳定后，把一块卡普片装上，记下百分表和毫伏表的初始读数，快速确定电压值与百分表读数之间的标定曲线，完成这个过程的时间不超过 5 分钟。具体方法是：一人负责改变百分表的读数，每次改变量为 0.3~0.5mm 之间，另一人则记下每个百分表读数所对应的毫伏表读数，这样得到大约 40~50 组数据。然后启动数据采集程序，进入数据自动采集阶段，计算机每隔半小时自动采集一次数据。干燥结束后，把标定的数据输入计算机，回归出电压值与百分表读数之间的标定曲线方程，利用此方程把计算机得到的电压数据转化为百分表读数。卡普片在任何时刻的矢高等于对应于此时刻的计算值与百分表初始读数之差。

## 2 结果与分析

表 1 为各卡普片对应的标定方程。由表可见，对应于各条矢高-干燥时间曲线的标定曲线方程的相关系数均达到了 0.9999 以上，这说明把电压值转化为位移量时具有很高的精确度，保证了结果的可靠性。

表 1 各卡普片对应的标定方程

Table 1 the standard equation for corresponding cupping slice

试件编号	标定方程	相关系数	干燥条件
A	$y = -0.0398x^2 + 2.0692x - 5.2503$	$R^2 = 0.9999$	$T=75^{\circ}\text{C} \Phi=66\%$
B	$y = -0.0393x^2 + 2.1435x - 6.4849$	$R^2 = 0.9999$	$T=83^{\circ}\text{C} \Phi=45\%$
C	$y = -0.0373x^2 + 1.8766x - 5.4074$	$R^2 = 0.9999$	$T=65^{\circ}\text{C} \Phi=66\%$
D	$y = -0.0437x^2 + 1.977x - 5.9008$	$R^2 = 0.9999$	$T=74^{\circ}\text{C} \Phi=32\%$

图 2 为用卡普-电涡流位移传感器装置连续监测卡普片矢高变化而得到的一组矢高-干燥时间曲线。可见这个方法连续、准确地监测到干燥过程矢高增大、减小、又反向增大的整个过程，从而实现了干燥过程木材内应力的连续监测。

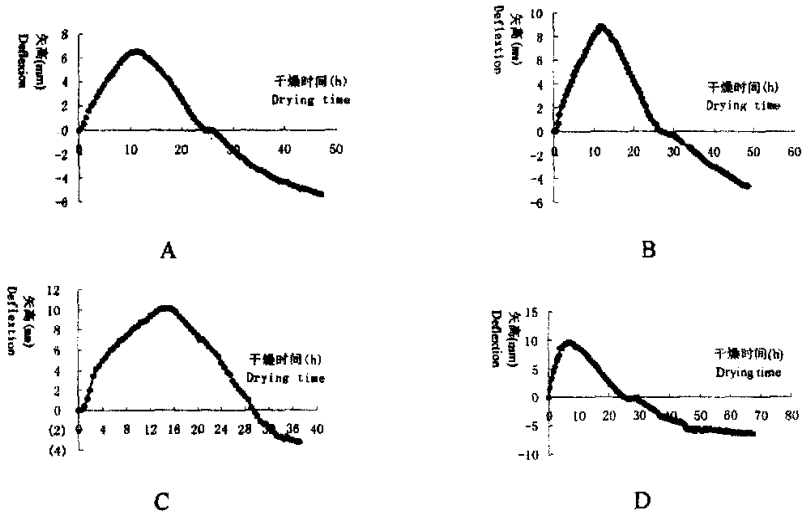


图 2 A-D 为不同干燥条件下的矢高-干燥时间曲线

Figure 2 deflexion-drying time curves under different drying conditions

表 2、3 分别为矢高递增阶段、矢高递减及反向递增阶段的回归方程。

表 2 矢高递增阶段的回归方程

Table 2 the regression equations for the phase of deflexion increment

试件编号	矢高增大阶段的回归方程	相关系数
A	$y = -0.0307x^2 + 1.1248x - 0.1828$	$R^2 = 0.9979$
B	$y = -0.0302x^2 + 0.9647x - 0.2359$	$R^2 = 0.9981$
C	$y = -0.0421x^2 + 1.309x - 0.1482$	$R^2 = 0.9888$
D	$y = -0.236x^2 + 2.9501x + 0.3291$	$R^2 = 0.9952$

表 3 矢高递减及反向递增阶段的回归方程

Table 2 the regression equations for the phase of deflexion degression and opposite increment

试件编号	矢高递减及反向递增阶段的回归方程	相关系数
A	$y = 0.0094x^2 - 0.9377x + 19.237$	$R^2 = 0.9907$
B	$y = 0.0074x^2 - 0.7839x + 15.204$	$R^2 = 0.995$
C	$y = 0.006x^2 - 1.0177x + 25.226$	$R^2 = 0.9873$
D	$y = 0.0058x^2 - 0.7003x + 14.765$	$R^2 = 0.9943$

表 2、表 3 表明，干燥过程矢高的递增阶段可用二次方程式  $y=ax^2+bx+c$  表示，其中  $a<0, b>0, c<0$ ；矢高递减及反向递增阶段也可用二次方程式  $y=ax^2+bx+c$  表示，其中  $a>0, b<0, c>0$ 。它们的相关系数大部分达到了 0.99 以上。这说明干燥过程卡普片矢高变化具有明显的规律性：不论在矢高的增大阶段，还是减小及反向增大阶段，矢高的变化速度都呈单调递减趋势。由于干燥过程矢高的变化与木材内应力变化存在明显的相关性，矢高的变化规律在一定程度上也说明了木材干燥应力的变化规律。由此可得出推论：干燥过程木材表层呈现出拉应力减速递增、减速递减，以及应力转换以后压应力减速递增三个阶段。可以从干燥过程木材含水率变化速度这个角度对这个推论进行了解释：在干燥初期，木材表层含水率很快降到了纤维饱和点以下而开始收缩，表层收缩得越快，其拉应力增大得就越快，反之则越慢。而表层的收缩速度由其吸着水的排除速度决定，吸着水的排除速度随表层含水率的降低而减小。因此干燥初期木材表层拉应力的增长速度随着表层含水率的降低而减小，从而表现出减速递增的趋势。当拉伸应力达到峰值以后，与表层相邻的内层含水率也降到了纤维饱和点以下而收缩，其收缩的速度随内层含水率的降低而减小，因此表层拉应力降低以及干燥后期压应力增大的速度也都呈现出单调递减的趋势。同理，笔者推测，芯层应力在干燥过程的变化具有与表层类似的规律，可分为三个阶段：干燥初期芯层压应力减速递增阶段、芯层压应力减速递减阶段、以及干燥后期芯层拉应力减速递增阶段。

### 3 结论

(1)干燥过程矢高的变化具有明显的规律性,且可分为三个阶段:1.卡普片向上弯曲的矢高递增阶段 2.卡普片向上弯曲的矢高递减阶段 3.卡普片反向弯曲的矢高递增阶段。1阶段大致对应表层拉伸应力的递增阶段,2阶段对应表层拉伸应力的递减阶段,3阶段对应芯层拉应力的递增阶段。干燥过程的矢高变化过程可用二次方程式  $y=ax^2+bx+c$  表示,在矢高上升阶段,  $a<0$ ,  $b>0$ ,  $c<0$ ; 在矢高递减及反向递增阶段,  $a>0$ ,  $b<0$ ,  $c>0$ 。

(2)该方法不仅准确地监测到矢高增大、减小、又反向增大的整个过程,而且利用计算机自动地采集、存储数据,从而实现了木材干燥应力的自动、连续、在线监测。测量装置结构简单,除了信号接收系统,几乎不需要额外的投入,易于被生产接受。装置小型化后能置于干燥窑内部,有望用于干燥实践。

#### 主要参考文献:

1. McMillen J.M. 1955a. Drying stress in red oak. Forest Products Journal.5(1):71
2. McMillen J.M. 1955b. Drying stress in red oak: Effect of temperature. Forest Products Journal. 5(4):230
3. G.Chen, R.B.Keey, J.C.F.Walker, 1997,The drying stress and check development on high temperature kiln seasoning of sapwood radiata boards. Holz als Roh-und Werkstoff. 55:59-64
4. 滕通源等. 1995. 南方阔叶材木材干燥初期应变特点的研究. 木材工业. 9(4):6-11
5. 刁习明 何玲芝. 1994. 阔叶材干燥应力的研究--温度对干燥应力的影响.林业科技. Vol.19 No.2:37-41
6. 常建民 胡松海. 1997. 非接触式测试木材干燥应力的方法的研究. 第六届全国木材干燥学术研讨会论文
7. 西尾茂. 1972. 卡普法干燥应力推定.(日) 木材工业.27(12)

\*第一作者简介: 高建民 45岁 副教授

北京林业大学工学院(100083)