

木材皱缩

Wood collapse

王喜明 著

中国林业出版社

.71
.1



王喜明 1964年6月生。1985年在内蒙古林学院获木材科学与工程专业学士学位；1988年在东北林业大学获木材科学与技术硕士学位；2001年在北京林业大学获木材科学与技术博士学位；2001年在中国林业科学院林业工程博士后流动站做博士后研究工作。现任内蒙古农业大学林业工程学院教授、副院长，木材科学与技术学科带头人，内蒙古自治区沙生灌木资源利用研究会常务副会长，全国木材干燥研究会副会长，西北地区木材工业委员会副主任，东北林业大学兼职教授，中国林业科学研究院博士生导师。长期从事木材加工专业的教学、科研和工程设计工作。

ISBN 7-5038-3430-7



9 787503 834301 >

定价：32.00 元

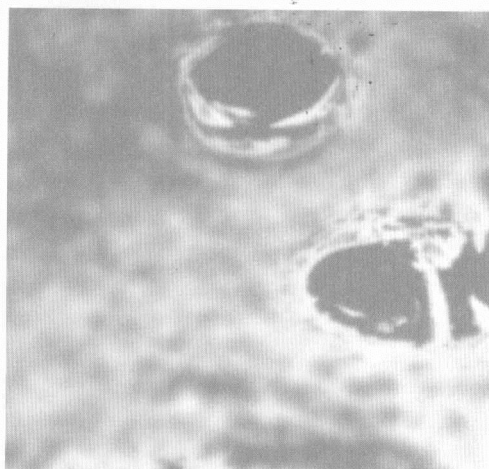
国家自然科学基金资助项目

S781.71
W394.1

木材皱缩

Wood collapse

王喜明 著



中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

木材皱缩 / 王喜明 著.

北京: 中国林业出版社, 2003.8

ISBN 7-5038-3430-7

I. 水… II. 王… III. 水蒸发—
影响—木材—收缩—研究 IV. S781.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003)
第 044581 号

出 版: 中国林业出版社 (100009
北京西城区刘海胡同 7 号)

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电 话: 66184477

发 行: 全国新华书店

制 作: 北京合之易图文制作有限公司

印 刷: 中国科学院印刷厂

版 次: 2003 年 8 月第 1 版

印 次: 2003 年 8 月第 1 次

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 9

字 数: 160 千字

定 价: 32.00 元

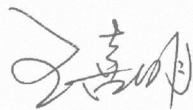
前 言

木材皱缩是木材干燥时因水分移动引起的一种干燥缺陷。木材皱缩的宏观表现是板材表面呈不规则的局部向内凹陷并使横断面呈不规则图形，同时木材厚度方向收缩率大幅度增加；微观表现通常呈多边形或圆形的细胞向内溃陷，细胞变得扁平而窄小，严重时细胞壁上还会出现细微裂纹。皱缩不仅使木材的收缩率增大，损失增加，而且因其并非发生在木材所有部位或某组织的全部细胞，因而导致木材干燥时产生变形。皱缩时还经常伴随内裂和表面开裂，开裂使木材强度降低甚至报废。虽然多数木材在干燥时均会发生程度不同的皱缩，但某些木材更易发生，已经发现容易发生皱缩的树种有澳大利亚桉树属、日本大侧柏、美洲落羽杉、北美香柏、北美红杉、胶皮糖香树、杨木、苹果木、马占相思、沼泽栎木等。即使是同一种木材，因在树干中的部位不同，其皱缩的程度也不同，其中，心材较边材、早材较晚材、树干基部和梢部较中部的木材、幼龄材较老龄材容易发生皱缩；生长在沼泽地区的木材较生长在干燥地区的木材、侵填体含量大的木材、闭塞纹孔多的木材较其他木材容易产生皱缩。

近一个世纪来，各国学者在木材皱缩形成动力学、木材皱缩形成的基本条件、木材皱缩形成过程的可逆性（恢复）、木材皱缩与木材性质之间的关系等方面进行了研究。就木材皱缩形成动力方面的研究归纳为“毛细管张力说”（澳大利亚的 Tiemann 等）、“干燥应力说”（日本的林和男等）、“两者联合说”（澳大利亚的 Stamm 等），但尚未定论。就木材皱缩形成的基本条件、木材皱缩形成过程的可逆性（恢复）等方面的研究，虽然提出了温度、含水率、木材的化学组成对细胞强度的影响，但是人们忽略了在水分非平衡状态过程中，木材细胞壁的流变

学特征,以及毛细管张力或干燥应力对处于水分非平衡状态细胞的作用这样一个问题。鉴于此,本研究在归纳前人研究的基础上,依据木材细胞壁构造学、木材流变学、木材物理学等基础理论,构筑了木材皱缩过程的理论模型;以山杨、大青杨、苹果木和马占相思为研究树种,通过自由水相变过程减少木材皱缩机理的研究、木材皱缩过程中木材细胞形态变化的超微观察、木材皱缩过程的调控和有效控制木材皱缩干燥工艺的研究等,验证了上述皱缩过程模型的正确性;从而确定了木材皱缩的评价指标。该项研究不仅丰富了木材中水分移动、木材流变学、木材干燥静力学和运动学等基础理论,而且对于木材干燥新技术新工艺的开发具有十分重要的意义。

该项研究得到国家自然科学基金的资助,项目编号为39760063,项目名称为“水分蒸发引起木材皱缩形成机理的研究”。研究过程在北京林业大学赵广杰教授的指导下完成,内蒙古农业大学的薛振华、安珍、冯利群、刘晓丽和王欣参加了该项目的研究。



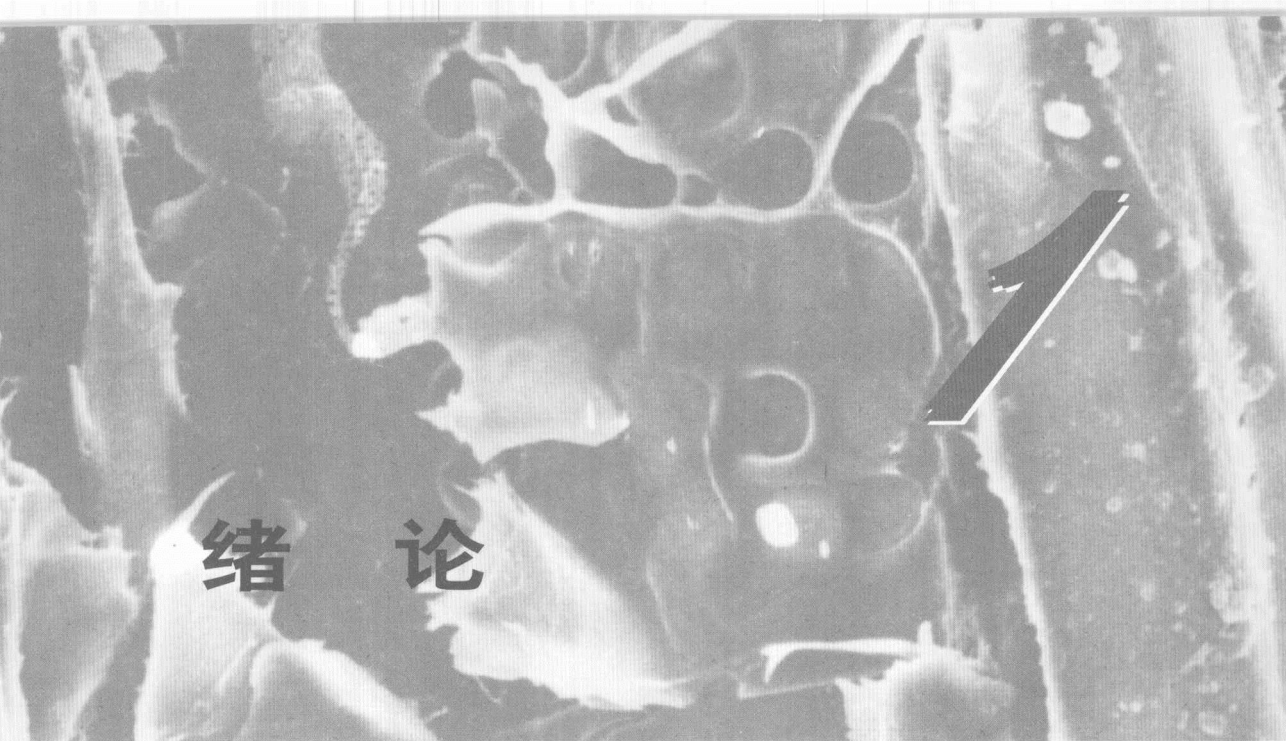
2003年7月

目 录

前 言

1 绪论	1
1.1 研究现状	1
1.2 研究目的和意义	7
1.3 研究思路、研究内容和技术路线	8
2 木材细胞皱缩形成机理的模型构筑与理论探讨	10
2.1 绪言	10
2.2 木材的干缩	12
2.3 木材中的毛细管	14
2.4 毛细管张力	15
2.5 纤维饱和点以上水分的移动	18
2.6 水分移动过程中弯月面的形成过程和 皱缩形成模型构筑	20
2.7 温度、含水率对木材抗压强度和 木材皱缩条件的影响	26
2.8 结论	31
3 自由水相变过程对木材皱缩的影响	33
3.1 绪言	33
3.2 材料与方法	35
3.3 结果与讨论	36
3.4 结论	42
4 木材细胞皱缩形成过程的可视化超微观察	44
4.1 山杨木材细胞皱缩过程的可视化观察	44
4.2 马占相思木材超微构造及其皱缩	52
4.3 苹果木材超微构造及其皱缩	60

5 木材皱缩形成过程的调控	68
5.1 干燥工艺条件对木材皱缩特性的影响	68
5.2 干燥工艺条件对预冻处理材皱缩特性的影响	74
5.3 杨木干燥基准及其皱缩特性的研究	79
5.4 热压干燥对杨木皱缩的影响	86
5.5 杨木预冻处理材干燥皱缩特性的研究	93
6 木材皱缩的评价指标	103
6.1 绪言	103
6.2 评价指标的确定及其测量方法	104
6.3 大青杨材皱缩特性及其评价	108
6.4 结论	111
7 山杨小径材干燥皱缩特性和干燥工艺	112
7.1 引言	112
7.2 材料与方法	113
7.3 山杨小径材的构造及其特性	114
7.4 山杨小径材的干燥特性和干燥工艺	117
7.5 结果讨论	124
7.6 结论	125
8 结论	126
8.1 木材细胞发生皱缩的基本条件	126
8.2 木材皱缩的性质	127
8.3 木材皱缩的形成机理	128
8.4 木材皱缩形成模型和形成过程	128
8.5 木材皱缩过程的调控	129
参考文献	131



绪 论

1.1 研究现状

1.1.1 木材皱缩的概念和特性

皱缩 (collapse) 亦称溃陷, 是木材干燥时水分移动过快所产生的毛细管张力和干燥应力使细胞溃陷而导致的不正常不规则的收缩 (王喜明 1989; 林和男等 1975; 寺尺真等 1975, 1974, 1986)。皱缩通常是在干燥初期由于温度高, 自由水移动速度快而产生的木材干燥缺陷。其他木材干燥缺陷都是在纤维饱和点以下产生的 (曹兰兴 1987; 成俊卿 1985; 梁世镇 1985; 刘元 1994; 朱政贤 1995), 而木材皱缩则是在含水率很高时就有可能产生, 且随着含水率的下降而加剧 (王喜明等 1995)。木材皱缩的宏观表现是板材表面呈不规则的局部向内凹陷并使横断面呈不规则图形; 微观表现通常呈多边形或圆形的细胞向内溃陷, 细胞变得扁平而窄小, 皱缩严重时细胞壁上还会出现细微裂纹 (王喜明 1991)。皱缩不仅使木材的收缩率增大 (Kauman 1960, 1961, 1964; Kollmann 1956), 损失增加 5%~10% (王喜明 1989), 而且因其并非



发生在木材所有部位或某组织的全部细胞,因而导致木材干燥时产生变形(刘元 1995; 彭海源 1989)。皱缩时还经常伴随内裂和表面开裂,开裂使木材强度降低甚至报废。虽然多数木材在干燥时均会发生程度不同的皱缩,但某些木材更易发生(王喜明 1989)。已经发现,容易发生皱缩的树种有:澳大利亚桉树属(刘元 1994; Chafe 1990)、日本大侧柏(小林好纪 1985, 1986, 1986, 1986)、美洲落羽杉、北美香柏、北美红杉、胶皮糖香树(成俊卿 1985)、杨木(王喜明 1989, 1991)、苹果木、马占相思(滕通濂 1999)、沼泽栎木等。即使是同一种木材,因在树干中的部位不同,其皱缩的程度也不同,其中,心材较边材、早材较晚材、树干基部和梢部较中部的木材、幼龄材较老龄材容易发生皱缩;生长在沼泽地区的木材较生长在干燥地区的木材、侵填体含量大的木材、闭塞纹孔多的木材较其他木材容易产生皱缩(Kollmann 1956; 小林好纪 1986; 王喜明 1988)。木材皱缩具有如下性质:

(1) 选择性

不是所有木材的所有细胞都能发生皱缩,而是具备了一定条件的细胞才可能发生皱缩,它决定于木材细胞的自身条件和干燥工艺的外界条件。即在干燥过程中当作用在木材细胞上的毛细管张力的和大于木材细胞的抗压强度时,木材细胞才能发生皱缩现象(寺尺真等 1974; 王喜明 2000)。

(2) 可破坏性

木材细胞皱缩的自身基本条件可以改变,木材细胞的皱缩过程可以通过干燥工艺的外界条件来实施调控。如通过预冻处理可以在细胞腔内产生气泡(寺尺真 1974, 1986; Choong 1973),使纹孔膜破裂,细胞的气密性下降(王喜明 1999; Ilic 1993; Kibblewhite 1980; Chafe 1993);蒸汽处理也可以破坏细胞的气密性(Chafe 1990; 1993);用有机液体代替木材中的水分等(Tiemann 1934)。上述预处理均改变了细胞皱缩的基本条件,将本来能够产生皱缩的细胞不发生皱缩。另外,



通过调控干燥工艺条件,降低水分移动的速度,同时降低毛细管张力,也可以减少皱缩。对木材进行压缩处理可以使木材细胞发生变形,破坏细胞的气密性 (Donaldson 1995; Tiemann 1942; Yang 1998); 在受拉状态下干燥木材时,也可以减少毛细管张力 (寺尺真等 1975; Tiemann 1948)。

(3) 可恢复性

如果皱缩细胞没有真正发生细胞壁破坏,再度进行热湿处理可以使皱缩细胞恢复。当木材含水率为 15% 时,利用温度 100℃,相对湿度 100% 的蒸汽进行处理 (Greenhill 1938),大部分的皱缩木材可以恢复 (Hart 1964, 1984),因为在纤维饱和点以下,细胞腔内无自由水存在,高温不再会产生皱缩条件,木材显然具有一定的塑性,使其能够恢复到或接近原来的形状 (Bryan 1960; Tiemann 1929)。总之,皱缩细胞的恢复具有选择性 (Pankevicius 1961)。

1.1.2 木材皱缩的形成原因

目前,关于木材干燥时发生皱缩的原因有多种认识: Kauman 等认为,皱缩是由于木材干燥时的含水率梯度产生的压应力超过木材细胞的横纹抗压强度所致,这种压应力又归因于木材的干缩力,这种力的作用是由于细胞腔内的自由水蒸发以后在细胞腔内形成真空而使细胞溃陷 (成俊卿 1985; Kauman 1960); 寺尺真等认为由于细胞中自由水移动时产生的毛细管张力超过木材细胞的横纹抗压强度所致 (寺尺真 1974; 小林好纪 1986; Wilkins 1987; Kalman 1964)。如在某些完全封闭的细胞中,当自由水通过纹孔膜的微孔向外蒸发时形成弯月面,产生毛细管张力,这种张力只有在细胞腔内充满水分时才能通过细胞腔完全作用于细胞壁 (Kalman 1964),如果细胞腔中存在空气泡,那么这种空气泡在压力作用下膨胀,使作用于细胞的压力减小,这时细胞不会发生溃陷 (寺尺真 1975)。Kauman 对澳大利亚最容易皱缩的王



按木材进行试验研究认为(1960),毛细管中的液体张力是皱缩的基本原因,但干燥应力对皱缩的程度有显著影响。作者对中国山杨小径材的研究认为,自由水移动时产生的毛细管张力是引起木材细胞皱缩的主要动力,干燥温度越高,木材发生皱缩的程度越大,而干燥应力对皱缩的影响作用很小(王喜明 2000)。

基于前人的研究结果,作者认为:在纤维饱和点以上,自由水通过纹孔膜上的微孔向外移动时,微孔中形成了弯月面,于是产生了毛细管张力,这种毛细管张力,通过饱水的细胞腔传递到细胞壁,当毛细管张力的总和超过木材细胞的横纹抗压强度时,木材细胞就产生了皱缩。另外,随着干燥过程的进行,木材还产生了干燥应力,这种应力将和毛细管张力联合作用于细胞上,但干燥应力比毛细管张力要小。Chafe 认为,木材皱缩的 $1/4$ 是由于干燥应力引起, $3/4$ 是由于毛细管张力引起的(Chafe 1992);寺尺真用干燥试验证明,毛细管张力和干燥应力都是木材细胞皱缩的主要作用力(寺尺真 1974)。

由此可见,木材细胞发生皱缩需具备两个条件,即木材细胞的自身基本条件和作用于细胞上的外界条件。自身基本条件是:木材细胞具有良好的气密性;细胞处于饱水状态而细胞腔内无气泡;细胞腔与水的接触角小,水对细胞壁的润湿性好;纹孔膜上微孔的直径足够小以及木材细胞的横纹抗压强度小等。外界条件主要是:干燥过程中作用于细胞上的毛细管张力和干燥应力之和大于木材细胞的横纹极限抗压强度,即当毛细管张力和干燥应力对木材细胞所产生的压力大于木材细胞的横纹抗压极限强度时,木材细胞皱缩。只有当木材细胞具备自身基本条件,并在适合的外界条件下才会发生皱缩。因此,木材细胞皱缩具有很强的选择性,表现为皱缩一般发生于某些木材的特定部位、特定组织或某组织的局部。某些阔叶材的薄壁细胞最容易皱缩。

基于上述理论,大木材干燥时,其干燥工艺条件构成了木材细胞皱缩的外界环境条件,对皱缩有很大影响,即木材细胞在具备了皱缩



的基本条件时,还必须要有一定的外部作用,使水分移动过程中所产生的对细胞的压力大于木材细胞的横纹极限抗压强度才能发生皱缩。但干燥工艺也可以改变木材细胞皱缩的基本条件,对木材皱缩具有调控作用。研究表明,对木材进行预冻处理和蒸汽处理可破坏木材细胞的基本条件 (Cuevas 1969),如蒸汽处理可使木材细胞腔内的侵填体、纹孔膜破裂,从而破坏木材细胞的气密性 (寺尺真 1986);对木材进行预冻处理,可使细胞腔内产生空气泡等,在不同程度上破坏了木材细胞皱缩的基本条件 (Ilic 1995)。因此,在干燥过程中合理控制干燥工艺,使由于水分移动而产生的压力小于木材细胞的横纹极限抗压强度,木材细胞便不会皱缩。众多研究表明,干燥温度是影响木材皱缩的主要工艺参数 (王喜明 2000; 王欣等 2000; Huffman 1972),干燥温度越高,木材细胞皱缩越大。澳大利亚的 Innes 利用应力应变模型 (Immes 1995),采取不同的干燥措施,计算出澳大利亚桉树木材皱缩的临界温度,结果表明,在皱缩临界温度以下干燥木材时,木材细胞不会皱缩,在临界温度以上干燥时,木材细胞皱缩会随着干燥温度的增加而加剧。作者在研究干燥介质参数对木材皱缩的影响中指出,温度对木材皱缩有显著影响,而相对湿度对皱缩的影响比温度要小 (王喜明 2000; 王欣 2000)。已经发生了皱缩的木材细胞,可通过调湿处理或浸泡处理使其全部或部分恢复 (Bryan 1960),可见,皱缩又具有恢复性。因此,对于那些容易发生皱缩的木材,在制定木材干燥工艺时,加强后期调湿处理,可使已经皱缩了的细胞得以全部或部分恢复,从而进一步减小皱缩。

综上所述,木材发生皱缩的形成机理可归纳为三种说法:毛细管张力说、干燥应力说和两者联合说。

1.1.3 木材皱缩的评价

以上是木材细胞皱缩的基本理论,在上述理论的指导下,各国学

者对木材的皱缩特性也进行了研究。在众多研究皱缩特性的报告中,涉及到一个共同的问题,就是如何评价木材的皱缩特性及其程度。综合归纳起来,定量的指标有如下几种)服部芳明 1983, 1985; 王喜明 2000; Chafe 1992):

(1) 干缩率 (SR)

木材干燥前后尺寸差占干燥前木材尺寸的百分比。干缩率越大,木材皱缩的程度越大。从木材的干缩率随含水率的变化曲线可以分析到易皱缩木材和不易皱缩木材的典型差异。中国学者刘元研究桉木的皱缩特性时指出,木材皱缩具有阶段性(刘元 1994)。

(2) 皱缩面积 (S)

板材横断面干燥前后的面积差。是反映木材利用率的一项重要指标,皱缩面积越大,板材利用率越低(王喜明 1989)。

(3) 皱缩深度 (H)

干燥板材横断面垂直方向上的厚度差。是反映板材断面规则程度的一项指标,与皱缩面积相比,皱缩深度更具有实际意义,因为大部分板材是在刨平后才被使用(王喜明 1989)。

(4) 皱缩因子 (CF)

是反映板材横断面积与周边长度变化的一项指标,同时对板材的内裂也综合地予以评价。其数值大小为:板材横断面周长(包括内裂周长)的平方与板材横断面面积(去除内裂)的比值(Tiemann 1915)。

(5) 体积干缩率 (V_s)

在不考虑纵向干缩的情况下,此项指标与皱缩面积具有同样意义,但对纵向干缩率大的小径材等则应用体积干缩率去评价。

干缩率、皱缩面积、皱缩深度、皱缩因子、体积干缩率这几项指标侧重点不同,各有区别,彼此之间又紧密联系,有时可相互替换。干缩率是比较心边材皱缩严重程度的指标,同时也可以测试出木材发生皱缩时的含水率;皱缩深度是评价皱缩木材在皱缩宽度不大并且皱缩



区域塌陷又很深时的评价指标,它能更准确地显示出干燥试样的皱缩程度;皱缩面积表示的是干燥试样的横截面积变化量,如果木材在纵向上的收缩几乎可以忽略,那么皱缩面积与体积干缩率在评价皱缩效果时侧重点应是一致的;皱缩因子是评价皱缩缺陷的一个很好的指标,不论试件有无开裂,都能显示其独特的优势,所以大多数情况下采用皱缩因子来评价皱缩更准确有效,特别是对于那些已经发生了内裂的板材,其他几项指标都不能准确地反映皱缩程度,此时的优势就体现出来。

1.2 研究目的和意义

近一个世纪来,各国学者在木材皱缩形成动力学、木材皱缩形成的基本条件、木材皱缩形成过程的可逆性(恢复)、木材皱缩与木材性质之间的关系等方面进行了研究。就木材皱缩形成动力方面的研究,可以归纳为“毛细管张力说”(Tiemann等)、“干燥应力说”(林和男等)、“两者联合说”(Stamm等)。但尚未定论。就木材皱缩形成的基本条件、木材皱缩形成过程的可逆性(恢复)等方面的研究,虽然提出了温度、含水率、木材的化学组成对细胞强度的影响,但是人们忽略了在水分非平衡状态过程中,木材细胞壁的流变学特征,以及毛细管张力或干燥应力对处于水分非平衡状态细胞的作用这样一个问题。鉴于此,本研究在归纳前人研究的基础上,依据木材细胞壁构造学、木材流变学、木材物理学等基础理论,构筑木材皱缩过程的理论模型,以山杨、大青杨、苹果和马占相思为研究树种,通过自由水相变过程减少木材皱缩机理的研究、木材皱缩过程中木材细胞形态变化的超微观观察、木材皱缩过程的调控和有效控制木材皱缩干燥工艺的研究等,验证了上述皱缩过程模型的正确性。最后,确定了木材皱缩的评价指标。此项研究不仅丰富了木材中水分移动、木材流变学、木材干燥静力学

和运动学等基础理论,而且对于推动木材干燥新技术和发展新工艺均具有十分重要的意义。

1.3 研究思路、研究内容和技术路线

本项目选择大青杨、山杨、北京杨、马占相思、苹果木等五个容易皱缩的树种为研究对象,通过干燥过程中的水分移动研究皱缩机理,在此基础上,构建皱缩模型。通过分析水的表面张力、毛细管现象、温度和含水率对木材细胞强度和皱缩的影响,观察木材细胞壁的构造,找出上述木材容易皱缩的原因,进而制定木材皱缩的调控措施,确定有效控制皱缩的干燥工艺。

具体研究内容如下:

(1) 木材皱缩形成过程的模型构筑与理论分析

包括木材中自由水的移动、水的表面张力、毛细管现象、温度和含水率对木材细胞强度的影响。

(2) 自由水相变过程中木材皱缩形成机理的研究

包括自由水相变后木材组织结构的变化、纹孔膜结构的变化、自由水相变时间对作用效果的影响。

(3) 木材皱缩过程的超微观察

包括皱缩过程的超微观察、组织结构的变化与含水率的关系、木材细胞组成发生皱缩的顺序。

(4) 木材皱缩形成过程的调控

包括温度、湿度对素材和预冻处理材皱缩特性的影响。

(5) 干燥工艺对木材皱缩的有效控制

即分析常规干燥和热压干燥对木材皱缩特性的影响,确定有效避免木材皱缩的干燥工艺。

(6) 木材皱缩评价指标的研究



从宏观上确定评价木材皱缩特性的方法和指标。

研究方法和技术路线如下：

(1) 皱缩机理的理论探讨和模型构建

根据皱缩机理构筑皱缩模型，将物理学中水的表面张力、毛细管现象等知识应用在木材与水分的关系和纤维饱和点以上水分的移动中，分析模型建立的理论基础。

(2) 自由水相变过程对木材皱缩的影响

用水和冰相关的知识解释木材中自由水的相变过程，预测相变过程中可能发生的物理现象，并用扫描电子显微镜验证上述物理现象。最后，通过干燥工艺试验说明预冻处理可以减少皱缩。

(3) 木材皱缩过程的研究

用扫描电子显微镜观察不同含水率阶段木材细胞横断面结构的变化，从中找出皱缩的规律；并观察哪个细胞先发生皱缩，在什么时候发生皱缩，从而进一步验证皱缩机理。

(4) 木材皱缩形成过程的调控

采用正交试验法确定温度、湿度对素材和预冻处理材皱缩特性的影响。

(5) 木材皱缩评价指标的研究

参考前人研究成果，找出从宏观上评价木材皱缩特性的方法和指标，并用其评价木材的皱缩特性。

(6) 干燥工艺对木材皱缩特性的影响

用常规干燥和热压干燥法研究木材的皱缩特性，确定有效避免木材皱缩的干燥工艺。

此项研究融木材的材性、构造和木材的干燥特性为一体，用木材学、物理学和干燥学基础知识解释干燥缺陷发生的机理，是木材干燥运动学的重要组成部分。该项目的研究成果将填补国内在木材皱缩研究方面的不足。