

# 水蒸汽前处理对五树种压缩变形恢复率及力学性能影响的研究

赵钟声<sup>1</sup> 刘一星<sup>1</sup> 井上雅文<sup>2</sup> 东原 贵志<sup>2</sup>

(1.东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040 ; 2.日本京都大学木质科学研究所, 宇治 611-0011)

**摘要:** 本研究对中国和日本产五个树种---大青杨 (*P.ussuriensis*)、落叶松(*L.gmelini*)、杉木 (*Cunninghamialanceolata*)、日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)、日本厚朴(*Mangnolia obovata*)进行横纹压缩, 水蒸汽前处理方法, 保持其压缩后的尺寸, 并通过恢复处理, 研究了各种方法和处理条件对压缩变形固定效果的影响及各种处理方法的作用机理, 在详细测量分析处理后试件的抗胀率 ASE、重量损失率、密度、变色、力学强度性能指标的基础上, 对影响压缩变形固定效果各因子及各处理方法对处理材物理力学性能的影响进行了分析, 发现半纤维素降解是释放内应力的主要因素, 是降低压缩变形恢复率的一个主要方面, 但过度分解会造成木材力学强度的下降; 木质素的软化、流动、及冷却后内聚力的形成是降低压缩变形恢复率的另一主要方面。变形固定过程中的热量传递和色差的改变也在一定程度上揭示了压缩变形固定与能量释放间的某种内在联系。

**关键词:** 木材流变学、压缩变形恢复率、抗胀率、重量损失率、细胞壁基质物质、释放内应力、内聚力的形成。

## The influence of water vapour pretreatment on five species' recovery ratio of transverse compressive deformation as well as their mechanical properties

Zhao Zhongsheng<sup>1</sup> Liu Yixing<sup>1</sup>; Masfumi Inoue<sup>2</sup> Takashi Higashihara<sup>2</sup>

(1. Northeast Forestry University Harbin, PR China; 2 Wood Research Institute, Kyoto University, Uji 611-0011)

**ABSTRACT :** Directed this research transverse compressed five species of trees found in China and Japan (Ussuri Poplar, Larch, Common Chinese Fir, Japanese Cedar, Whiteleap Japanese Mangnolia), water steam treatment before methods to preserve it's measurement after compression, and studied the influence to the compressive deformation's fixation of each method and their action mechanism, tested and analysed ASE, WL, density, change of color, mechanical intensity of the wood after processed, analysed the factors affecting the result of compressive deformation's fixation of the five species and the influence to the processed wood's physico- mechanical properties of each method, it is discovered that the decomposition of semi-cellulose the main reason of inside stress's release and a main aspect of decreasing the compressive deformation's recovery rate, but excessive decomposition can cause the decrease of wood's mechanical intensity; and another main aspect of decreasing the compressive deformation's recovery rate is lignin's softening, flow, and the formation of cohesion after cooled. Meanwhile, the transmission of heat and the change of color during deformation's fixation revealed some certain relation between compressive deformation's fixation and the release of energy at some degree.

**KEY WORDS:** rheology of wood, compressive deformation's recovery rate, ASE, WL, cell wall structure substan

### 1 前言

高温高压水蒸汽处理对压缩木材固定机理的研究已有很多报道, 其中有代表性的是: 分子架桥说<sup>[1]</sup>和凝聚结构说<sup>[2]</sup>。但水蒸汽前处理木材压缩变形固定机理的研究还未有报道。木材是高分子材料, 对其进行水蒸汽处理, 木材(或压缩材)的半纤维素、木质素等构成物质的结构会发生变化, 通过先高温水蒸汽处理再进行压缩的方法可分析与通常的先压缩再水蒸汽处理方法的差异来考察压缩材的变化差异, 并能一定程度的反映和揭示出半纤维素、木质素等构成物质在压缩材变形固定中的变化趋势及作用机理。

### 2 试验材料与设备

## 2.1 供试材

气干径切日本柳杉、日本厚朴；中国产杨树、落叶松、阔叶杉边材、平均气干密度 0.34、0.54、0.43、0.71、0.41

压缩及变形固定试验的试件平均尺寸均为 10（纤维方向）×30（径向）×30（弦向）

尺寸稳定性试验的试件平均尺寸为 5（纤维方向）×30（径向）×30（弦向）

力学性能试验的试件尺寸为 150（纤维方向）15×（径向）×5（弦向）

## 2.2 实验设备

BF400 型加热器加热温度 0-100 度、S37.5 型压缩成型机最大使用压力 210kgf/cm<sup>2</sup> 最大行程 200mm、AB50LUTE 型百分表最大量程 50.8mm 精度 0.01mm LITHUM 型计时秒表、FA-2000 型电子秤。最大量称 2100g 精度 0.01g、DK600 型干燥机、CM-2600 测色仪、AG-500E 力学试验机、水蒸汽处理罐等。

## 3 试验方法

### 3.1 水蒸汽前处理对压缩恢复率影响试验

对五个树种气干材制成尺寸为 10（纤维方向）×30（径向）×30（弦向）的试件，减压吸水至饱水状态，放入 DK600 型干燥机至绝干，再放入高压蒸汽处理罐，处理压力为 1.6Mpa，时间分别为 2、4、8、16、24、40、60 分钟，100℃加热，在压板表面温度 105℃条件下，平均压缩率 52%至干燥，再放入 DK600 型干燥机，测量各阶段试件径向尺寸计算压缩恢复率。

### 3.2 恢复处理试验

2.1 试验后的试件，减压吸水至饱水状态，再放入 DK600 型干燥机至绝干，共进行 6 次重复；100℃水中 2 小时煮沸处理，再放入 DK600 型干燥机至绝干。测量各阶段试件径向尺寸，计算压缩恢复率。

### 3.3 水蒸汽前处理对试件尺寸稳定性影响试验

对五个树种气干材制成尺寸为 5（纤维方向）×30（径向）×30（弦向）的试件，减压吸水至饱水状态，放入 DK600 型干燥机烘至绝干，每组 3 个试件，分别为 2、4、8、16、24、40、60 分钟、200℃加热，再减压吸水至饱水状态，测量各阶段试件 3 个方向（纤维方向、径向、弦向）尺寸及重量，计算试件的抗胀缩率。

### 3.4 水蒸汽前处理对试件力学性能影响试验

对五个树种气干材制成尺寸为 150（纤维方向）×15（径向）×5（弦向）的试件，减压吸水至饱水状态，放入 DK600 型干燥机烘至绝干，每组 5 个试件，分别为 0、2、4、8、16、24 小时、180℃加热，再在相对湿度 65%，温度为 20℃的 DK600 型干燥机中烘至气干状态，测量各阶段试件 3 个方向（纤维方向、径向、弦向）尺寸及重量，在力学试验机支点距离 100 采用中间集中载荷方式压溃试件，记录并计算试件的抗弯弹性模量（MOE）和弯曲强度（MOR）。

### 3.5 热处理对试件材色影响试验

力学试验后的试件在光学色差计上，每个试件均匀取 3 点测量其色度值，计算色差及明度。

## 4 结果与讨论

### 4.1 水蒸汽前处理时间及恢复处理对压缩变形恢复率的影响

从图 1 可以看出随着水蒸汽前处理时间的延长各树种的压缩恢复率都呈下降的趋势，在高温高湿条件之下随着时间的延续，木材内部的应力逐渐松弛而呈递减趋势，另外也有人认为热处理使木材的吸湿性降低，使恢复处理时的压缩恢复率降低。

由图 2 的试验结果可以看出，当水蒸汽前处理时间为 60 分钟时，经绝干—饱水—煮沸—绝干，反复七次的处理，在每次饱水

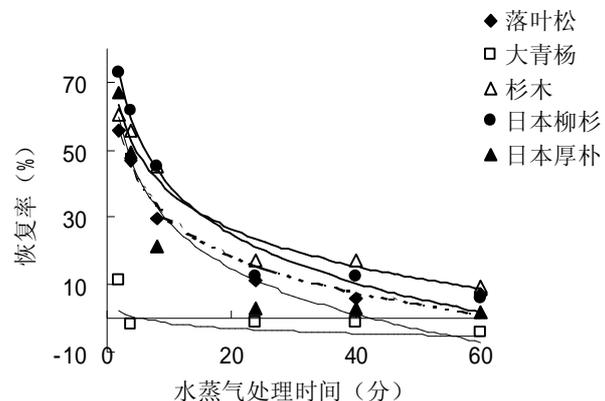


图1 水蒸汽前处理时间、树种对压缩恢复率的影响

和绝干时测量试件径向的尺寸，计算出试件的压缩变形恢复率。可以看出，五树种试件都表现为随着恢复处理次数的增加压缩变形恢复率有所增加的趋势，既每次循环压缩变形恢复率都有一定程度的增加，七次的恢复处理后，大青杨的压缩变形恢复率为-4%左右；日本厚朴的压缩变形恢复

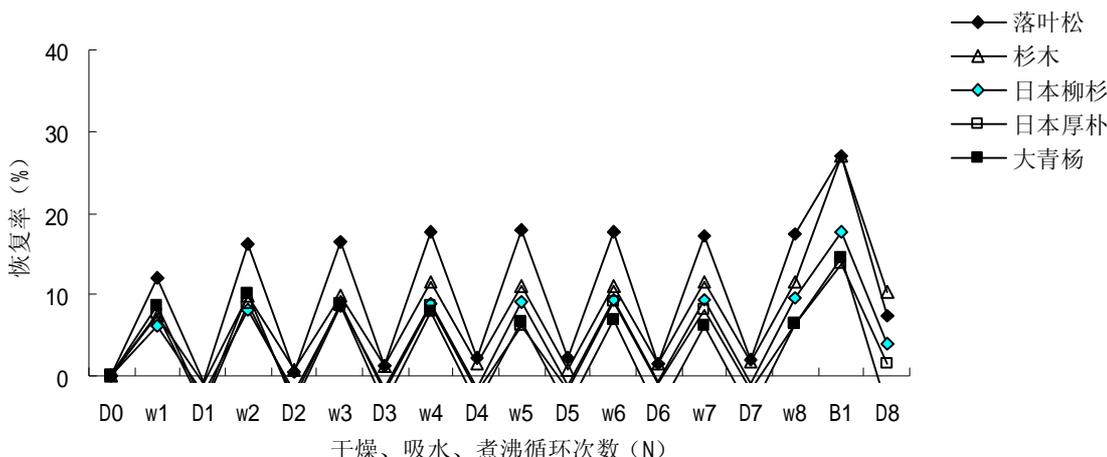


图2 干燥、吸水、煮沸及水蒸气前处理60分钟对柳杉压缩恢复率的影响

率为 1.4%左右；日本柳杉的压缩变形恢复率为 4%左右；落叶松的压缩变形恢复率为 5%左右；杉木的压缩变形恢复率为 9%左右。总体来说针叶材试件压缩变形恢复率均比阔叶材的压缩变形恢复率为高，随着木质素和半纤维素的软化和分解程度增加，蒸煮处理前五树种的压缩变形恢复率都控制在 1%以下，蒸煮处理后，木质素的凝聚化程度降低，压缩木材试件内的残余应力使压缩变形恢复率有所增加，特别是针叶材中的木质素含量较高，受热后的恢复率比阔叶材的值为高，压缩变形恢复率也较阔叶材高。

由以上试验结果可以看出随着水蒸汽前处理时间的增加，各树种的压缩恢复率都呈递减的趋势，大青杨和日本厚朴等阔叶材最终压缩变定效果相对更好些；杉木、日本柳杉、落叶松等针叶材的最终压缩变定效果稍差些，因为针叶材木素含量比阔叶材的木素含量多，200℃水蒸汽处理后木素的弹黄系数大为降低、内部结构应力也大为降低，煮沸处理前的吸水、干燥处理并未使其得到多少恢复，但是当煮沸处理时木素获得足够的能量而使其本身的变形恢复量突增，再度干燥也难以恢复到煮沸处理前的水平了。而大青杨的半纤维素和木素对高温高压水蒸汽的耐受性更低，处理后内部结构应力水平更低，在整个吸水、干燥、煮沸循环中一直保持着相当低的胀缩性，最终压缩恢复率始终保持在 0%以下。

#### 4.2 水蒸汽前处理时间对重量减少率及抗胀率的影响

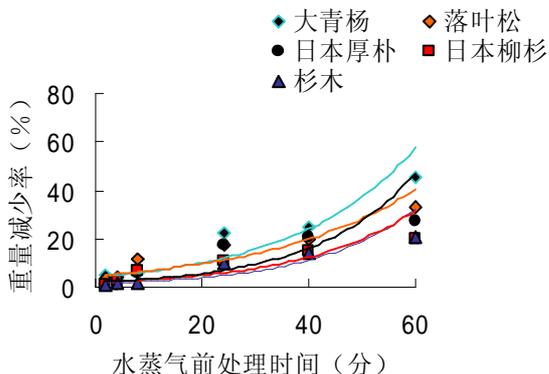


图3 重量减少率与水蒸气前处理时间、树种间关系

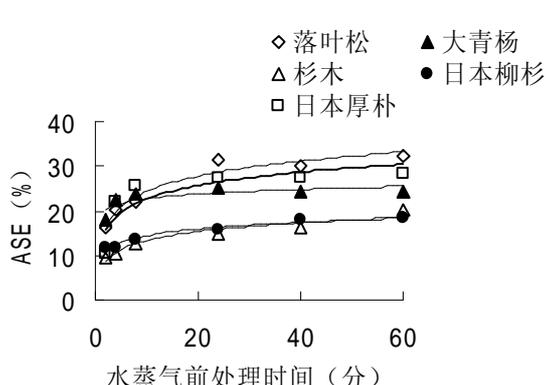


图4 抗胀率与水蒸气前处理时间、树种间关系

由图 3 的试验结果可见五树种都随着水蒸汽前理时间的增加重量减少率增加，200℃、60分钟水蒸汽前处理后，大青杨重量减少率都在 40%以上；日本厚朴的重量减少率都在 25%左右；落叶松重量减少率为 30%左右；杉木和日本柳杉的重量减少率均为 20%左右。一般认为在 200℃高温高湿作用下木材细胞壁结构物质中，半纤维素降解剧烈，重量减少主要是半纤维素降解造

成的，而半纤维素的降解直接影响半纤维素与纤维素的联结点数量，此数量减少使试件压缩变形时的压缩应力值降低。

由图4的试验结果可见五树种都随着水蒸汽前处理时间的增加抗胀率增加，特别是落叶松的抗胀率增加最快，200℃、60分钟水蒸汽前处理后抗胀率33%左右，大青杨和日本厚朴的抗胀率都在30%左右；杉木的抗胀率为20%左右；日本柳杉的抗胀率为18%左右，一般认为在200℃高温下木材细胞壁结构物质中，分子链中羟基的脱落，木材内部的结晶部分再取向、非结晶部分的结晶化、半纤维素的部分降解，使木材细胞壁结构物质的吸湿性大为降低，提高了木材的抗胀缩性，这些都减弱了木材对水的吸湿作用。在木材压缩变形恢复过程中，吸湿性的影响是较大的，降低木材的吸湿性，也就一定程度地控制了木材的湿胀性，使压缩变形恢复率大为降低。

#### 4.3 重量减少率及抗胀率与压缩变形恢复率间关系

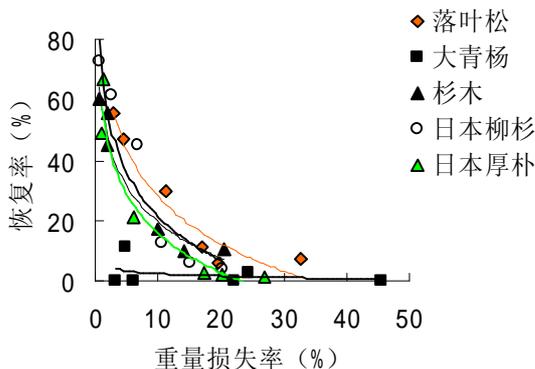


图5 压缩恢复率与重量损失率及树种间关系

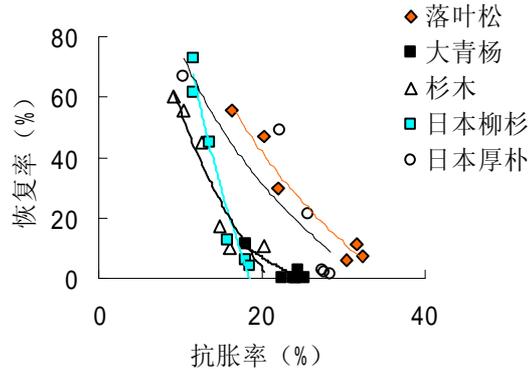


图6 压缩恢复率与抗胀率及树种间关系

通过图5可以看出随着重量减少率的增加各树种的压缩变形恢复率都呈快速地下降，在200℃高温高湿下木材细胞壁结构物质中，半纤维素降解剧烈，重量减少主要是半纤维素降解造成的，而半纤维素的降解直接影响半纤维素与纤维素的联结，半纤维素的减少使试件压缩变形时的压缩应力值降低。其中落叶松、日本柳杉、杉木的变化曲线表现较为平缓，既随着重量减少率的降低压缩变形恢复率呈比较缓慢的降低变化，日本厚朴则随着重量减少率的增加压缩变形恢复率呈急剧降低的变化。大青杨一直处于压缩变形恢复率低水准。这可能是因为200℃高温高湿使阔叶材中的大量半纤维素发生剧烈降解，木质素也发生一定程度降解和凝聚化变化，半纤维素的急剧减少和木质素的凝聚化对压缩变形恢复率的影响程度明显增大。

通过图6可以看出随着抗胀率增加各树种的压缩变形恢复率都呈快速地下降，在200℃高温下木材细胞壁结构物质中，半纤维素的部分降解，分子链中羟基的脱落，纤维素结晶化程度提高使木材细胞壁结构物质的吸湿性大为降低，提高了木材的抗胀缩性，这些都减弱了木材对水的吸湿作用。使压缩变形试件在恢复处理时的吸湿性下降，一定程度地抑制了压缩变形试件的压缩变形恢复率，其中落叶松和日本柳杉的抗胀率与压缩变形恢复率的关系最为明显。

#### 4.4 水蒸汽前处理时间对弯曲强度及弹性模量的影响

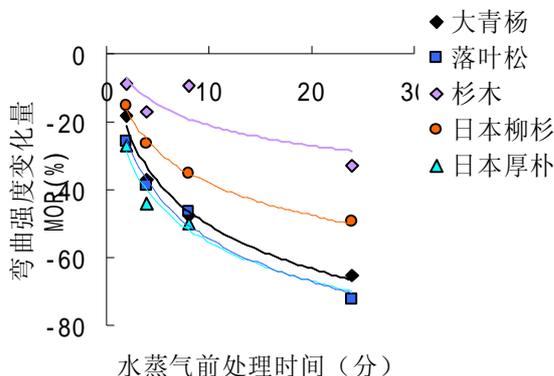


图7 弯曲强度变化量与水蒸气前处理时间及树种间的关系

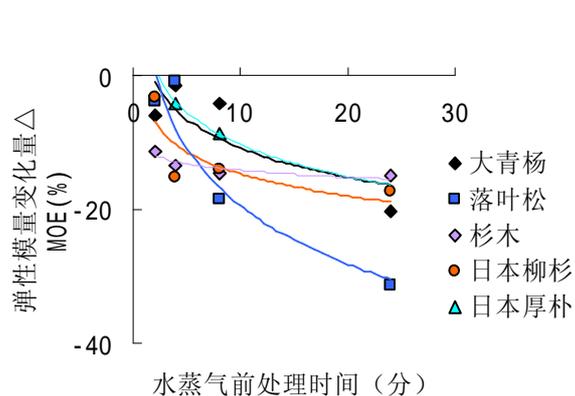


图8 弹性模量变化量与水蒸气前处理时间及树种间的关系

由图 7 可以看出各树种都随水蒸汽前处理时间的增加弯曲强度呈快速下降趋势，处理时间为 2 分钟时，杉木弯曲强度相对变化量为 9%，日本柳杉弯曲强度相对变化量为 15%，大青杨弯曲强度变化量为 18%左右，落叶松弯曲强度变化量为 26%左右，日本厚朴弯曲强度变化量为 27%左右。当水蒸汽前处理时间为 24 分钟时，杉木弯曲强度相对变化量为 33%，日本柳杉弯曲强度相对变化量为 49%，大青杨弯曲强度变化量为 65%左右，落叶松弯曲强度变化量为 72%左右，日本厚朴弯曲强度变化量为 57%左右。落叶松和阔叶材的弯曲强度下降最为明显，随着温度的升高木素软化、半纤维素降解加快特别是阔叶材中的半纤维素含量较多绝对降解量也多些，弯曲强度下降的也相对多些。

由图 8 可以看出各树种都随水蒸汽前处理时间的增加弹性模量呈快速下降趋势，处理时间为 2 分钟时，杉木弹性模量相对变化量为 -9%，日本柳杉弹性模量相对变化量为 -3%，大青杨弹性模量变化量为 -2%左右，落叶松弹性模量变化量为 -4%左右，日本厚朴弹性模量变化量为 1%左右。当水蒸汽前处理时间为 24 分钟时，杉木弹性模量相对变化量为 -14%，日本柳杉弹性模量相对变化量为 -17%，大青杨弹性模量变化量为 -20%左右，落叶松弹性模量变化量为 -31%左右，日本厚朴弹性模量变化量为 -36%左右。木材弹性模量与纤维的拉伸强度和微纤丝的集束强度密切相关，微纤丝的集束强度与木材纤维与纤维间的横向联结强度有关，它主要靠半纤维素与纤维素的联结来实现，针叶材管胞均匀半纤维素的这种作用对联结纤维素的整体弹性模量更为重要，阔叶材由于弹性纤维是其对弹性模量强弱影响的关键，因此随着温度的升高木素软化、半纤维素降解加快，纤维横向联结的主要成分半纤维素与纤维素的断点增加，引起弹性模量大幅度下降。

#### 4.5 水蒸汽前处理时间对明度及色差的影响

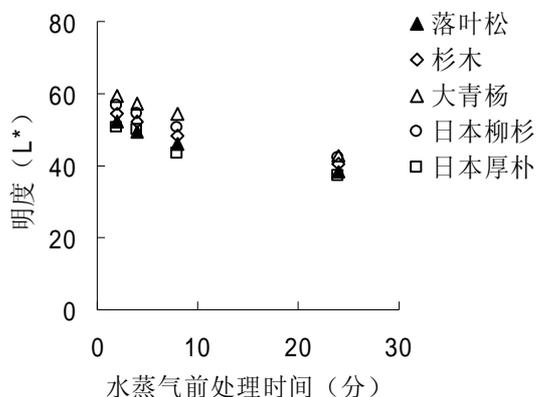


图9水蒸气前处理明度与处理时间及树种间关系

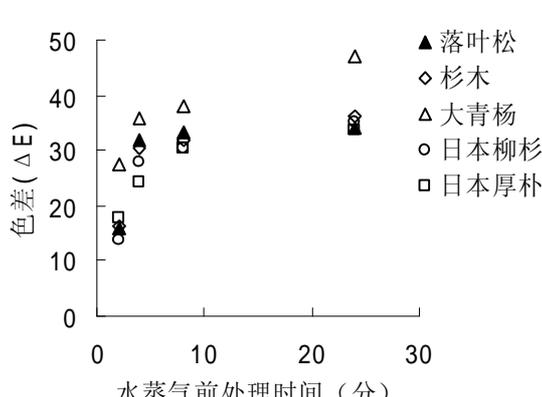


图10 水蒸气前处理色差与处理时间及树种间关系

由图 9 可以看出随水蒸汽前处理时间的增加各树种的明度均呈下降的趋势，水蒸汽前处理时间为 24 分钟、处理温度为 200℃时，大青杨的明度值为 42 左右；日本柳杉的明度值为 41 左右；杉木的明度值为 40 左右；落叶松的明度值为 39 左右；日本厚朴的明度值为 37 左右。明度的降低说明在这一过程中分子内的原子等微观粒子从高能层向低能层跃迁，以发射光能谱的形式释放能量，由于热处理的高温作用使这些微观粒子产生跃迁释放出能量使细胞壁弹性降低，随着细胞壁弹性降低程度的增加，压缩变形恢复率降低。木材的内部能量释放量增大，水蒸汽前处理高温作用使木材内部的细胞壁结构物质的半纤维素、木素等发生不同程度软化和降解，使其弹性变形能释放出来，致使弹簧系数降低，最终使压缩前后的木材内部应力降低压缩恢复率减少，提高了压缩木材的变形固定效果。

由上图 10 可以看出随着热处理时间的增加各树种的色差增加，水蒸汽前处理时间为 24 分钟、处理温度为 200℃时，大青杨的色差值为 47%左右，杉木的色差值为 36%左右，落叶松的色差值为 33%左右、日本柳杉的色差值为 35%左右，日本厚朴的色差值为 34%左右。色差的增加说明在这一过程中木材的内部能量释放量增大，水蒸汽前处理高温高湿作用使木材内部的细胞壁结构物质的半纤维素、纤维素、木素等发生软化和不同程度的降解，使其压缩变形能在一定程度释放出来，致使木材弹簧模型中的弹簧系数进一步降低，最终使压缩前后的木材内部应力降低压缩恢复率减少，提高了压缩木材的变形固定效果。

## 5 结论

1. 五树种试件都表现为随着水蒸汽前处理时间的增加压缩变形恢复率减少的趋势，经 60 分钟、200℃的水蒸汽前处理，再经煮沸等恢复处理后，日本柳杉、落叶松、杉木试件的压缩变形恢复率分别为 4%、4.8%、9.3%，大青杨、日本厚朴的压缩变形恢复率分别为-3.9%、1.4%，该方法有阔叶材的压缩变形恢复率比针叶材压缩变形恢复率小的倾向。

2. 五树种都随着热处理时间的增加重量减少率增加，特别是大青杨和落叶松的重量减少率最高，60 分钟水蒸汽前处理大青杨、落叶松重量减少率在 30%以上；日本柳杉的重量减少率重量减少率为 25%左右；杉木和日本厚朴的重量减少率都在 20%左右。随着重量减少率的增加，压缩试件的压缩变形恢复率减少。

3. 五树种都随着水蒸汽前处理时间的增加抗胀率增加，特别是落叶松的抗胀率增加最快，200℃、60 分钟水蒸汽前处理后，抗胀率 33%左右，大青杨和日本厚朴的抗胀率都在 30%左右；杉木的抗胀率为 20%左右；日本柳杉的抗胀率为 18%左右，随着抗胀率的增加压缩试件的压缩变形恢复率减少。

4. 随着对压缩变形试件水蒸汽前处理时间的增加各树种的弯曲强度和弯曲弹性模量值下降。

5. 随着热处理时间的增加，各树种木材的明度下降、色差增加。随着色差的增加各树种的压缩变形恢复率明显降低，大青杨和日本厚朴等阔叶材随着色差的增加木材压缩变形恢复率下降曲线的斜率更陡峭些；针叶材特别是杉木随着色差的增加压缩变形恢复率降低的速度明显低于阔叶材的降低速度。

6. 相同水蒸汽前理试验条件下不同树种压缩变形恢复率不同，总体而言针叶材压缩变形恢复率比阔叶材的压缩变形恢复率高。

## 参考文献

- 1 井上雅文等. 架橋による木材の圧縮変形の永久固定. 木材学会誌 1994.40 (9) 931-936
- 2 東原貴志等. 水蒸気処理木材の圧縮変形固定. 木材学会誌.2000.46. (4) : 291-297
- 3 李坚, 刘君良, 刘一星, 加热处理和水蒸汽处理对木材横纹压缩变形固定的作用, 东北林业大学学报.2000,
- 4 刘一星等.水蒸汽处理法制作压缩整形木的研究(1) 构造变化和尺寸稳定性, 东北林业大学学报, 2000, 28 (4) : 9-12
- 5 赵钟声.木材横纹压缩变形恢复率的变化规律与影响机制.东北林业大学博士学位论文.2003.5