

水曲柳顺纹压缩多向弯曲技术

宋魁彦¹ 王逢瑚¹ 宋宇宏²

(1.东北林业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150040; 2.国家林业局林产工业规划设计院 北京 100010)

摘要：木材自身的特性可以进行简单的弯曲，但是要获得较小的弯曲曲率半径和多向弯曲，应强化木材软化机理的研究，增大木材的塑性；在此基础上重点研究木材软化处理后的顺纹压缩机理和压缩技术，使木材在顺纹压力的作用下，细胞壁中微纤维之间产生滑移，导致木材细胞壁的壁层纵向产生褶皱；木材弯曲时的受压面褶皱加大，受拉面形成褶皱逐渐展平，在允许的形变范围内获得较小的单向和多向弯曲曲率半径；定型机理和定型技术的初步探讨以求得压缩弯曲木的形状稳定。研究表明，试件尺寸为280mm×16.5mm×16.5mm时，经过水热软化处理后，顺纹压缩率达到24%，圆形弯曲的曲率半径最小为75mm，S形弯曲的曲率半径最小45.44mm，压缩弯曲木定型温度120℃或180℃。

关键词：水曲柳 软化处理 顺纹压缩 弯曲定型

The Techniques of *F. mandshurica*, Longitudinal Compressing and Bending

SONG Kuiyan¹ WANG Fenghu¹ SONG Yuhong²

(1.College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University Harbin 150040; 2.Planning and Design Institute of Forest Products Industry, State Forestry Administration Beijing 100010)

Abstracts: Wood can be bended to simple shape with its own characters. To achieve small bending semi diameter and multi bending the plastic of wood will be increased with strengthening the theory of softening. From this point of view the theory of longitudinal compressing and the technique of compressing are studied. Cellular wall arises longitudinal crease when micro fibre slides with the effect of compressive stress. Then smaller bending radius will be gained with the scope of limited transmutation. When the compress surface is formed to drape and drawing surface is on the country with the action of bending moment. To get steady compressing-bending wood specimens the theory and technology of shape finalization are primarily discussed. The result indicates: The specimens with the size of 280mm×16.5mm×16.6mm dealt with water-heat softening and 24% ratio compression get the minimum radius 75mm and minimum radius of S shape 45.44mm. The temperature of shape finalization is 120℃ or 180℃.

Keywords: *F. Mandshurica*, Wood softening, Longitudinal Compressing, Bending Shape Finalization

木材顺纹压缩弯曲技术首先是将木材进行软化处理，增大分子间的自由体积空间和运动的能量^[4, 5]；其次是进行木材顺纹压缩，当顺纹压缩的木材解除压力后，木材的粘弹性特性随即显现出来，即木材在短时间内恢复其弹性变形，但是尚遗留一定量的永久变形^[2, 9]，这些永久变形主要是纤维或分子链之间产生纵向位移，在顺纹方向上细胞轴向产生褶皱，使木材的弯曲性能得到大大地提高；第三是木材在弯曲力矩的作用下，受压面褶皱加大，受拉面的褶皱被展平，在允许的形变范围内，被顺纹压缩的木材可以获得较小的弯曲曲率半径和实现多向弯曲，这一点通过电子显微镜的观察得到证实；最后是对弯曲的曲线形零件进行定型处理，以确保形状的稳定，定型的方法是采用不同的干燥温度进行，然后通过快速检验方法测试定型结果。

本研究主要从北方常用的硬阔叶材水曲柳入手，着重研究木材软化、顺纹压缩和弯曲的机理，以及木材软化、顺纹压缩和弯曲的技术条件。这些机理和技术条件与木材的特性、木材的细胞结构、细胞壁微纤维的结构变化有着错综复杂的内在联系。

1 实验方法和结果分析

1.1 试件制备

经过生产实践证明，塑性和单向弯曲性能比较好又适合制作弯曲木的树种有：水曲柳、柞木、桦木、榉木、黄檀、栎木、青冈、柚木、山龙眼及柳木等^[3]，因此选用水曲柳作为研究树种。水曲柳试件制备时，

第一作者简介：宋魁彦，1961年11月，男，硕士，东北林业大学，教授，木材科学与技术、设计艺术学学科。

*本文受黑龙江省攻关课题“木材压缩多向弯曲技术”资助³⁴⁶

通常选择木材纹理通直,不允许有腐朽,斜纹,夹皮,节子等缺陷,试件表面纹理斜度小于 10° 以下。目的是避免在顺纹压缩和多向弯曲时表面产生应力集中,表面粗糙度决定了木材的顺纹压缩和多向弯曲的效果,因此试件采用四面刨光,使毛料与模具、压板之间具有较好的接触,从而使毛料在加压和弯曲过程中受力均匀。试件尺寸规格为 $280\text{mm}\times 16.5\text{mm}\times 16.5\text{mm}$,这是根据模具和力学实验机的实际情况确定的。

1.2 试件软化

1.2.1 软化条件

本次实验采用的是最简单的、而且在生产中比较容易实现的水热软化处理方法。软化条件根据木材压缩的质量好坏确定,这也是本研究将软化条件作为一个比较重要的技术参数加以探索实验的,试件软化条件如表1所示。

表1 试件软化条件
Tab. 1 The condition of specimen soften

| 软化条件 Soften condition | 方案 A Condition A | 方案 B Condition B | 方案 C Condition C | 方案 D Condition D | 方案 E Condition E | 方案 F Condition F |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 温度 $^{\circ}\text{C}$ Temperature $^{\circ}\text{C}$ | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 时间min Time/min | 10~40 | 40~80 | 80~120 | 120~160 | 160~200 | 210以上 |

1.2.2 软化结果分析

木材膨胀形变是利用水进入到木材的非结晶区内,使木素、半纤维素和纤维素的非结晶区体积膨胀,增大自由体积空间,提高木材的塑性^[1]。加热可以使非结晶区中的木素、纤维素和半纤维素分子能量加大,同时在水、热的作用下,纤维素非结晶区湿胀,木素呈粘流态,半纤维素失去其联结作用,木材塑性加大。

在软化条件为方案A时,试件在顺纹压缩时开始需要的压力很大,在压缩过程中试件压力骤降,试件卸压后,试件表面出现了单一或成对的滑移面,尽管此时压力小于该树种的顺纹抗压强度,气干木材顺纹压缩破坏出现的滑移面,往往在低于破坏荷载的25%时便以发生^[10],说明试件软化不足,不能很好地实现顺纹压缩。

软化条件为方案E和F时,试件压缩时虽然所需的平均压力不大,但压力值上下变化较大。试件卸下后,测定试件整体压缩值,发现试件的上半部分明显被压缩,而试件的下半部分压缩率很低或几乎没有被压缩。这是由于试件塑性变形加大形成局部压力集中,导致压力不能有效地传递到试件整个长度上。因此试件顺纹压缩时,软化时间不能过长。

经过探索实验后,软化时间对试件的压缩和弯曲性能影响较大,时间过长和过短均不利于试件的顺纹压缩,水曲柳水热软化条件为方案B、C和D时,对于该试件的顺纹压缩条件影响较大,因此在实验时选定了这三种软化条件。

1.3 试件顺纹压缩

1.3.1 试件顺纹压缩方法

软化处理后的试件即刻进行顺纹压缩,主要施力源是在木材的轴向方向上,同时试件四周方向会产生一定的膨胀,因此应根据木材的尺寸、树种等适当施加一定的压力,以确保木材不产生过大的横向膨胀,但是这个方向的力又不能过大,否则会使木材在顺纹压缩时,压力没有传递到整个木材,使整根木材的压缩率不均匀。顺纹压缩时,在顺纹方向上的压缩速度应尽量缓慢,这样即可以保证木材的压缩适合木材本身的变形,又可以加大木材的塑性变形。在木材的压缩达到规定的压缩率后,木材应在压力机上保持一定时间的压力,以进一步增大木材的塑性变形。

1.3.2 木材顺纹压缩结果分析

(1) 压缩量和回弹量结果分析

在水曲柳顺纹压缩的探索性实验中,确定试件压缩率分别为18%、21%、24%、26%和27%。在压缩率为26%和27%时,试件压缩成功率仅为40%。根据实验结果,绘出试件压缩回弹后各点变化值如图1所示。

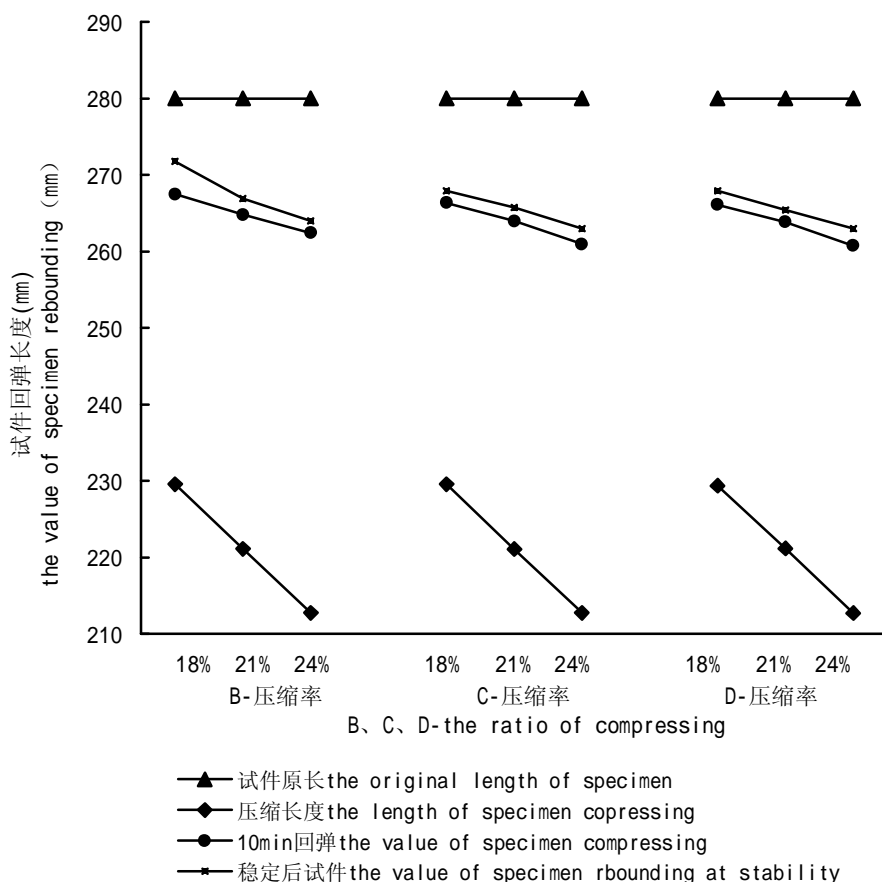


图1 试件压缩后回弹量各点的变化曲线

Fig. 1 The curve of specimen rebounding value on different experimental condition

从图中可以看出：在试件卸压后，试件的弹性变形几乎在瞬间完成，随着时间的延长，除一些弹性变形外，剩余的主要是粘弹性变形的恢复和遗留下来的塑性变形，这些变形除了木材自身的形变外，主要是木材细胞壁产生了褶皱，如图2所示的试件压缩后形成的褶皱。通过电子显微镜发现这些褶皱出现的多少或大小与木材压缩量以及回弹量有着直接的关系，也就是木材压缩越大、压缩后的回弹量的越小越好。如果压缩后的塑性变形小或压缩后的回弹长度大，势必不利于木材的多向弯曲。

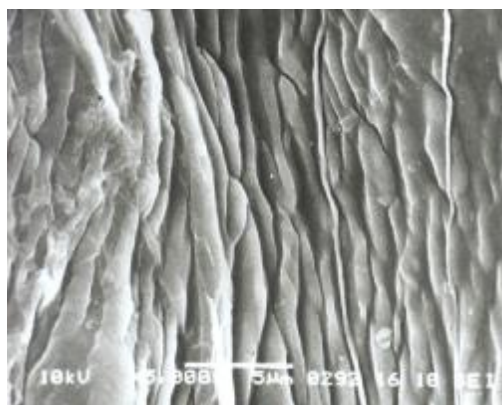


图2 试件导管内壁压缩后的电子显微镜照片（5000×）

Fig.2 Microscope photo of catheter inner wall after compression (Zoom in 5000 times)

通过水曲柳的顺纹压缩实验可得到：在三种软化条件下，就同一个压缩率而言，试件随软化时间的延长，木材粘弹性变形和塑性变形加大；随着压缩率的加大（压缩时间相应地加大），木材的粘弹性变形和塑性变形加大。

(2) 压缩回弹随时间变化规律分析

软化条件为方案B、C和D时，压缩率为18%、21%和24%的条件下，每隔2min测得一个回弹量，共测得0~20min、40min和基本稳定后的回弹量。根据实验结果，测得试件回弹量随时间的变化曲线如图3所示。通过图中可以看出：试件卸压后，瞬时即可恢复其特有的弹性变形，而粘弹性变形和塑性变形是在卸压后4min~10min后曲线趋于平缓；采用软化条件为方案C和D时，试件粘弹性变形的恢复速度（曲线）低于软化条件为B的试件。

图中也仅仅给出了试件卸压后20min的木材粘弹性变形恢复曲线，试件经过40min后，测得的试件长度回弹值变化已经极小，即趋于稳定。

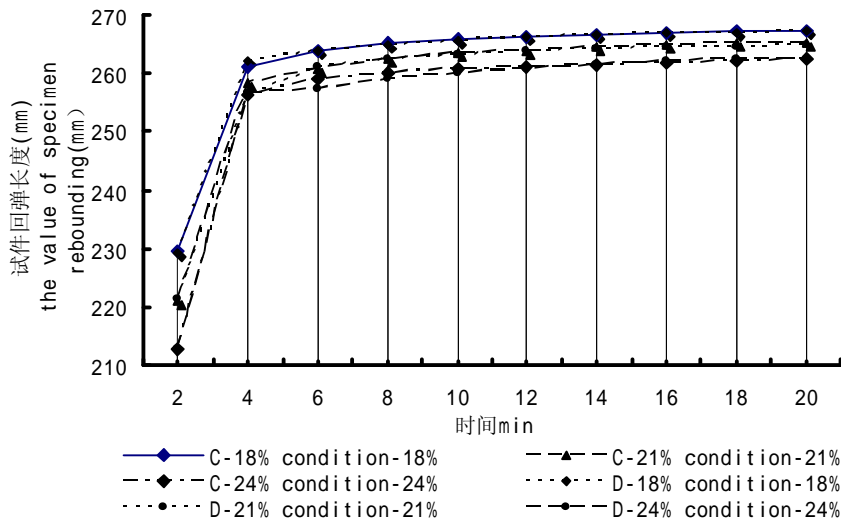


图3 压缩回弹量随时间变化曲线

Fig. 3 The curve of relationship between specimen rebounding and time

(3) 顺纹压缩时压力和形变

木材经过顺纹压缩后，利用木材存在的细胞壁形成的褶皱，即永久变形这一个原理来实现木材的多向弯曲。水曲柳试件在软化条件为C，顺纹压缩率24%时，得到了压力和形变曲线如图4所示。

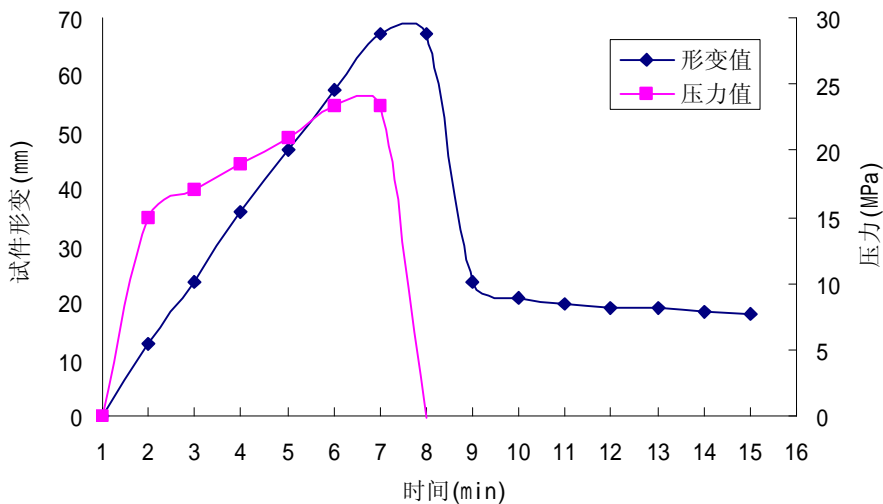


图4 水曲柳试件压力和形变曲线

Fig4 compressive stress and transmutation curve of *F. mandshurica* specimen

通过图中可以看出：试件在顺纹压缩过程中，作用在试件上的压力几乎在2min中内接近较大的值，而对应的形变成直线上升的趋势；在顺纹压缩2min后，压力升高的比率渐缓，但是形变还在成直线上升的趋势；当达到所需的压缩率后，试件开始卸压，随着压力的解除，试件的弹性恢复几乎在瞬间完成，而且这个弹性

变形值较大。随着卸压后的时间延长，试件的形变恢复较少或几乎处于停顿状态，在这个过程中，试件的塑性变形表现的非常明显。随着时间的延长，试件的塑性变形几乎不再进行，遗留下来的是永久性变形，这种变形主要体现在试件细胞壁出现的褶皱。

1.4 试件弯曲

1.4.1 实验方法

试件圆形弯曲采用内模具而无外模具，圆形弯曲模具是金属圆柱体；S型模具采用内外模具，每个模具可以同时弯曲4个试件，通过模具自身丝杠的推进实现，弯曲的曲率半径范围为30 mm~60mm。

1.4.3 木材弯曲结果分析

(1) 试件最小弯曲曲率半径

水曲柳试件最小弯曲曲率半径实验结果如表2所示。结果表明，水曲柳最小曲率半径的获得是在软化条件为方案D、压缩率分别为21%和24%时的试件中，最小曲率半径的平均值也集中在这个实验条件下。

表2 试件圆形弯曲时最小和平均曲率半径

Tab. 2 The minimal and average bending curvature radius in circular shape

| 实验条件 (test condition) | | C-21% | D-21% | C-24% | D-24% |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 指标(item) | | | | | |
| 最小曲率半径 the minimal curvature radius | 最小值 (mm) the minimum (mm) | 80 | 75 | 80 | 75 |
| | \bar{X} (average)(mm) | 91.11 | 86.11 | 90.56 | 86.67 |
| 标准差 s(mm) (standard deviation) (mm) | | 8.21 | 9.28 | 6.82 | 8.66 |
| 变异系数 CV (%) ((coefficient of variation) (%) | | 9.01 | 10.78 | 7.53 | 9.99 |
| 试件数量(number of specimens) | | 9 | 9 | 9 | 9 |

(2) 试件S型弯曲结果分析

水曲柳试件S型弯曲实验结果如表3所示。从表中可以看出，水曲柳S型弯曲的曲率半径最小值是在软化条件为方案D、压缩率分别为21%的实验条件下，而其它实验的条件下，得到的S型弯曲的曲率半径几乎接近。

表3 试件S型弯曲时的平均曲率半径

Tab. 3 The average bending curvature radius in S shape

| 实验条件 (test condition) | | C-21% | D-21% | C-24% | D-24% |
|---|--|-------|-------|-------|-------|
| 指标(item) | | | | | |
| S型弯曲曲率半径 (The average bending curvature radius in S shape) \bar{X} (mm) | | 46.89 | 45.44 | 46.78 | 46.56 |
| 标准差 s(mm) (standard deviation) (mm) | | 2.37 | 3.57 | 3.49 | 3.21 |
| 变异系数 CV (%) ((coefficient of variation) (%) | | 5.05 | 7.87 | 7.47 | 6.89 |
| 试件数量(number of specimens) | | 9 | 9 | 9 | 9 |

木材经过顺纹压缩后，由于木材具有的粘弹性特点，必然会产生永久的变形，这种永久变形实质上增大了木材的形变，这种形变是木材导管或管胞在纵向方向上形成褶皱的大小或多少有关。在试件顺纹压缩回弹过程中一些褶皱由于木材的弹性作用而减小，但是在弯曲过程中，试件的凸面褶皱又被逐渐展平或完全展平，如果褶皱展平的同时木材继续弯曲时，其拉伸形变小于允许的形变时，木材拉伸面不会产生破坏，而且可以达到较小的弯曲曲率半径和实现多向弯曲。在弯曲时的凹面褶皱又进一步加大恢复到木材顺纹压缩初期形成的褶皱，此时木材的压缩形变如果在允许的压缩形变内，试件可以弯曲较小的曲率半径或多向弯曲。

试件经过顺纹压缩后，还可以实现自身的扭曲和空间方向上的多向弯曲，而扭曲和空间弯曲的曲率半径直接受试件的最小弯曲曲率半径的限制，如果试件的最小弯曲曲率半径越小，其自身的扭曲和空间弯曲的曲

率半径也将最小。这个弯曲机理和前面探讨的最小曲率半径和S形弯曲一致。

1.5 试件定型

1.5.1 弯曲木干燥定型方法

被弯曲的曲线形零部件必须固定在模具或支架上进行干燥定型。由于弯曲木中的含水率较高，同时由于顺纹压缩和弯曲时木材产生的应力，必须通过定型处理释放木材的应力和降低木材中的水分。本次定型实验采用干燥定型方法，干燥定型选用了三种温度，即60℃、120℃和180℃。

在三种温度下干燥后的试件平均含水率为7.8%，然后分别进行水热（水温100℃）处理，测试水热时间为15min、25min、45min、65min和90min，以快速检测干燥定型的结果。

1.5.2 弯曲定型结果分析

当顺纹压缩木材被弯曲成一定的形状后，纤维素无论是处在卷曲程度还是处在张开状态，都比原来的分子状态能量高，发展趋势都是朝向恢复原来状态，这种趋势再加上结晶区的牵制作用使木材具有恢复原来形状的特性，即回弹特性^[6,7,8]。

当试件被弯曲成圆形后，在干燥定型前去掉内模具，进行干燥处理，当试件的水分蒸发时，试件由于细胞壁体积收缩，曲率半径将会减少，其曲率半径减少的幅度平均值为7.3%，当分别采用三种温度进行干燥定型时，测得试件的最终含水率的平均值为8.2%时。通过实验发现：试件干燥定型温度为60℃时，进行水热处理时，随着水热处理的时间延长，试件的回弹速度几乎成直线上升，如图5所示，这一点说明在弯曲时，试件中残留的应力会随着试件含水率和温度的提高而释放，同时纤维素的无定性区开始膨胀，半纤维素和木素的玻璃化转变温度降低，木材塑性提高，原来木材中应力平衡被打破，开始回弹，直到再次达到下一个应力平衡点，因此这个干燥定型温度不能满足试件定型要求，当试件的水热时间为90min时，试件可以轻易地扳成直线，同时还可以反方向弯曲并可以获得较小的曲率半径，通过这一点也可以证明经过压缩后的试件细胞壁形成褶皱；试件干燥定型温度为120℃和180℃时，进行水热处理，随着水热处理时间的延长，试件开始略有回弹，但是随着水热处理时间的延长，回弹趋于稳定，说明弯曲件的应力松弛会随着干燥定型的温度增加而减少，经过180℃温度处理的弯曲试件更为明显，此时弯曲试件内部的残余应力几乎完全丧失，少量的回弹主要是试件体积的膨胀。试件的这种应力丧失也验证了木材内部产生了剧烈的热降解反应，是木材细胞壁中的主要分子链，特别是半纤维素分子链被大量切断，导致初期应力释放的结果。

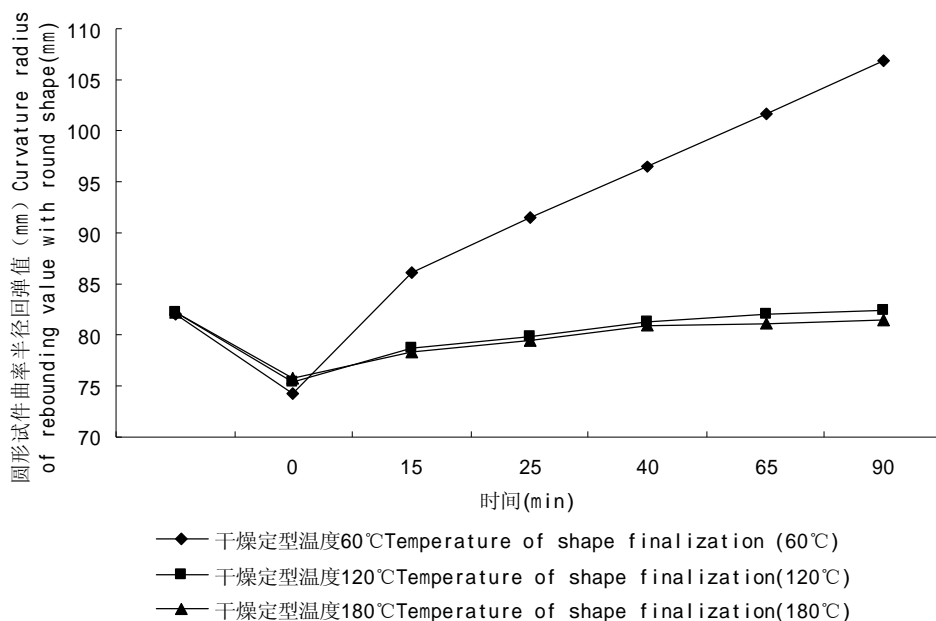


图5 圆形试件回弹曲线

Fig.5 Rebounding curve with round shape

当试件被弯曲成S形时，在干燥前由于采用模具固定干燥，因此当试件干燥到平均含水率7.8%时，试件从

模具卸下后，曲率半径没有改变，当经过三种温度进行干燥定型实验时，随着水煮时间的加长，在各自干燥定型温度下对应的试件回弹速度与圆形试件的回弹速度相比缓慢一些，这主要是试件在干燥定型过程中，S型试件内外模具的牵制作用，即试件的应力在干燥定型中有少量的释放。通过实验得到：试件的干燥定型温度在60℃时，很难实现干燥定型；试件的干燥定型温度为120℃和180℃时，定型效果比较理想，同时180℃时的干燥定型温度定型的试件效果好于120℃时的干燥定型效果，如图6所示。

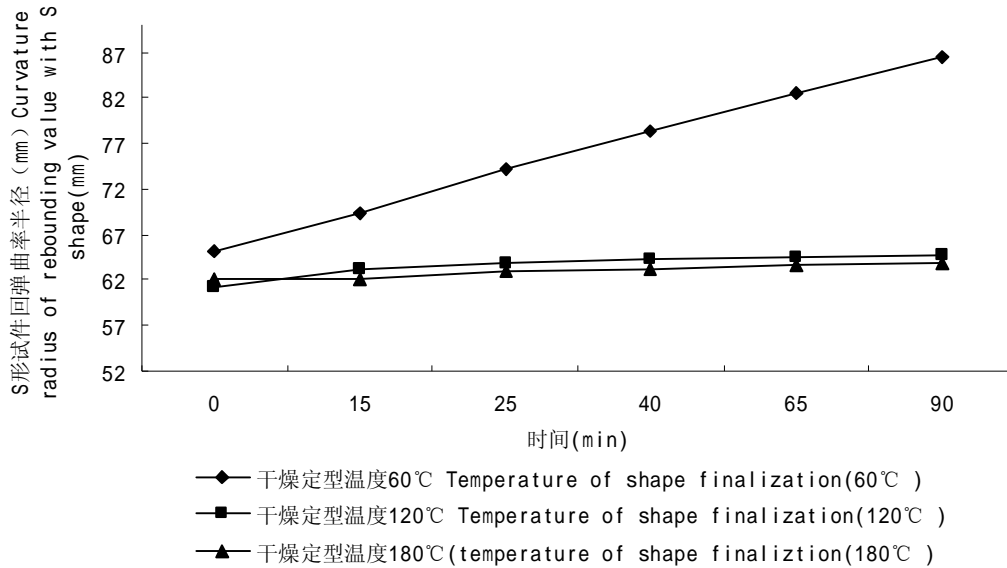


图6 S形试件回弹曲线
Fig.6 rebounding curve with S shape

2 结论

对于木材压缩多向弯曲技术，软化条件是一个比较关键的技术条件。软化时间过短或过长均不利于木材的顺纹压缩。试件经过顺纹压缩后，实现多向弯曲的一个重要条件是木材的细胞壁形成一定的褶皱，而这种褶皱出现的多少或大小与木材压缩回弹的量有着直接的关系，也就是木材压缩回弹后的长度越小越好。木材多向弯曲的曲率半径大小与木材压缩率成正比关系，即与木材中细胞壁形成褶皱的大小或多少成正比关系。采用干燥定型的方法既排除试件中的水分同时也是试件应力释放的比较好的办法。通过实验得到，试件干燥定型温度是试件定型的主要的技术指标，如果在允许的情况下，高温定型结果好于低温定型结果。

参考文献

1. 李坚等. 木材科学. 东北林业大学出版社. 1994
2. 王逢瑚. 木质材料流变学. 东北林业大学出版社. 1997. P5-12, P49
3. 木材工业实用大全. 家具卷. 中国林业出版社. 1998. 12. P372-380
4. 李坚. 加热、水蒸气处理对木材横纹压缩变形的固定作用. 东北林业大学学报. 2000. 4. P4
5. 李军. 浅谈曲木工艺中的蒸煮软化机理. 1997. 4. P4-6
6. 孙丽萍等, 木材横纹压缩过程中径向、弦向加载差异性分析, 林业科技, 1997
7. 侯红亮, 可压缩材料挤压过程有限元模拟, 金属成型工艺, 2001, 3
8. M.Norimoto. Wood Bending of Sugi and Hinoki from the Thinning Operation. Wood Research.1983.18.
9. J.M.Dinwood ie. Initializes smelt of the influence of moisture content and level of stressing on rate of creep and time to failure. W.S.T.1981.15.P125-144
10. 成俊卿. 木材学. 中国林业出版社. 1985. 9