

弯曲木构件弹性恢复与终含水率的关系研究

刘志佳¹, 李 黎², 鲍甫成¹, 王瑞娟³

(1. 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学 材料科学与技术学院, 北京 100083;

3. 北京市木材厂有限责任公司, 北京 100068)

摘 要:本研究探索弯曲木构件弹性恢复与终含水率之间关系,为弯曲家具的发展提供技术支持。试验以水曲柳、枫木和橡胶木为试验材料,通过水热处理方法软化木材并利用弯曲模具制造弯曲木构件,根据弯曲木构件弦长变化评价其弹性恢复与终含水率的关系。试验结果表明,弯曲木构件的弹性恢复与其终含水率之间呈正相关关系。对于不同的软化工艺,3种树种均在含水率最低时,试件的弹性恢复最小。如在软化工艺Ⅰ下,水曲柳试件终含水率为9.6%时、枫木试件终含水率为7.1%时和橡胶木试件终含水率为9.8%时,试件弦长变化较小,变化值分别为1.0、1.0和0.6 mm。对比本试验所选择的3个树种,软化工艺Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ的橡胶木试件弹性恢复较水曲柳、枫木试件小。对比本试验选择的3个软化工艺,软化工艺Ⅰ的水曲柳、枫木、橡胶木试件弹性恢复较软化工艺Ⅱ,Ⅲ小。

关键词:弯曲木;弹性恢复;软化工艺

中图分类号:S781.3

文献标识码:A

文章编号:1001-7461(2009)04-0169-05

Relationship between Elasticity Deformation and Final Moisture Content of Bending Wooden-Samples

LIU Zhi-jia¹, LI Li², BAO Fu-cheng¹, WANG Rui-juan³

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, P. R. China;

2. Academy of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P. R. China;

3. Beijing Woodworking Factory Co., Ltd, Beijing 100068, P. R. China)

Abstract: To provide theoretical support for the development of curving furniture, the relationship between elasticity deformation and final moisture content of bending wooden-samples was investigated. The experimental materials including manchuria ash, sugar maple and rubber wood were softened by boiling water, and were bent through using curved molds in the test. The relationship between elasticity deformation and its final moisture content of bending wooden-samples was evaluated through the chord change of samples. The results showed the higher the final moisture content of samples, the bigger the elasticity deformation. For the different softening processes, the elasticity deformations of the three materials were all lower when their final moisture contents were lower. For example, when the final moisture contents of manchuria ash, sugar maple and rubber wood samples were 9.6%, 7.1% and 9.8% respectively, the chord changes values were 1.0 mm, 1.0 mm and 0.6 mm respectively in the softening processes I. The chord changes of rubber wood samples were smaller than that those of other two materials in the softening process I, II and III, and the chord changes of all materials were smaller in the process I than that those in the softening process II, III.

Key words: bending wood; elasticity deformation; softening process

在曲木家具的生产和利用过程中,弯曲木构件 的弹性恢复影响构件的质量、安装、拆卸及互换性

收稿日期:2008-09-25 修回日期:2009-01-09

作者简介:刘志佳,男,中国林业科学研究院木材工业研究所博士研究生。研究方向:木基功能复合材料。E-mail:zhijiaL@caf.ac.cn

等。对弯曲木构件的弹性恢复进行研究,探索影响弯曲木构件弹性恢复的因子及其影响规律,对控制弯曲木构件的形变及曲木家具的发展具有重要意义。李大纲等研究了利用热处理对消除水曲柳木材弯曲变形的影响,提出了弯曲木制品尺寸稳定性的相关理论以及如何提高弯曲木尺寸稳定性的方法^[1]。杨创创等从理论上分析了含水率引起的弯曲件半径、角度改变,以及胶合弯曲件的端面扭曲变形规律,并讨论了含水率控制、陈放时间控制、后期处理等减小变形的主要控制措施^[2]。Chika Takahashi 等研究了在相对湿度变化的过程中,木材的机械吸湿蠕变对其静曲强度的影响,得出在相对湿度变化环境中,木材的弦向静曲强度较相对湿度不变的环境低^[3]。Chika Takahashi 等研究了含水率变化对木材弯曲蠕变的影响,得出在吸湿过程中,慢速吸湿时木材蠕变较快速吸湿时大,而在解析过程中,慢速解吸时木材蠕变较快速解吸时小^[4]。W. Dwianto 等研究了在高温蒸气下的木材压缩蠕变^[5],P. Navi 等研究了瞬时含水率对木材蠕变的影响^[6],T. Nakano 研究了在木材吸湿过程中的蠕变和熵变化^[7],S. Mohager 等研究了在相对湿度循环变化过程中,木材在长期载荷情况下的弯曲蠕变等^[8]。本研究通过水热软化处理木材,利用弯曲模具制造弯曲木构件,分析弯曲构件弹性恢复与其终含水率的关系,为该领域的发展提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料为水曲柳(*Fraxinus mandahurica*)、枫木(*Acer saccharum*)及橡胶木(*Hevea brasiliensis*)。材料购于北京万家灯火建材市场。其中,水曲柳产地为东北小兴安岭,颜色为灰褐色,纹理通直、径切面管孔线明显,弦切面有美丽花纹,材质坚硬,耐磨、涂饰性能好。枫木产地为北美,颜色为乳白色,木纹紧密、纹理均匀,强度适中,易涂饰。橡胶木产地为印度尼西亚,色泽淡、花纹美观、材质细致、加工性能好、不易变形和开裂。试件为径切板条,尺寸均为 220 mm(纵向)×17 mm(径向)×8 mm(弦向),数量共 108 件。

1.2 设备

YX-280D 型医用高压灭菌器,电热恒温鼓风干燥箱,游标卡尺,含水率测定仪,弯曲模具(模具形状如图 1,弦长为 175 mm)等。

1.3 软化工艺

根据实验设备的性能及木材中纤维素、半纤维

素及木素的玻璃化转变温度,本试验针对每种试件选择 3 种不同的软化工艺,见表 1。

表 1 软化工艺参数

Table 1 Process parameters of softening technique

树种及软化工艺		工艺参数		
		温度 /℃	饱和蒸汽压力 /MPa	时间 /h
水曲柳	软化工艺 I	112	0.16	5.0
	软化工艺 II	118	0.19	4.0
	软化工艺 III	124	0.23	3.5
枫木	软化工艺 I	112	0.16	4.5
	软化工艺 II	118	0.19	3.5
	软化工艺 III	124	0.23	3.0
橡胶木	软化工艺 I	112	0.16	3.0
	软化工艺 II	118	0.19	2.5
	软化工艺 III	124	0.23	2.0

1.4 试验过程

试件首先在常温下放入水槽中浸泡一周,再放入医用高压灭菌器进行水热处理,即软化试验。利用弯曲模具将软化后的试件制作成弯曲试样。将试样连同模具一起放入干燥箱中干燥,干燥温度 T 为 75℃;干燥 5,6.5 和 8 h 后,试件连同模具在室温下陈放一段时间,直至试件的温度降至室温。随后,将试件从模具中取出并利用含水率测定仪在试件纵向不同位置上分别测量各试件的含水率,平行测量 3 次,取其平均值作为最后的试样终含水率。在 0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 1 440 min 时测量试件弦长,如图 1。根据弦长变化评价弯曲试件弹性恢复与其终含水率的关系。

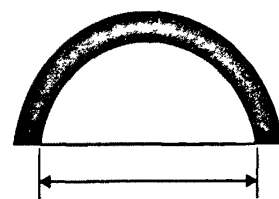


图 1 试件测量弦长

Fig. 1 Testing chord of samples

2 结果与分析

不同软化工艺条件下,重复 4 次试验。最后结果为 4 次试验结果的平均值。

2.1 软化工艺 I

干燥 5,6.5 和 8 h 后,水曲柳试件终含水率分别为 28.7%,17.0%和 9.6%,枫木试件终含水率分别为 17.9%,12.6%和 7.1%,橡胶木试件终含水率分别为 27.5%,17.3%和 9.8%。在 0,10,20,30,60,120,180, 1 440 min 时测量试件弦长,试验结果见表 2。

表 2 软化工艺 I 试件弦长与终含水率的关系

Table 2 The relationship between sample chord and final moisture content in the softening technique I

试件种类	试件含水率 /%	试件弦长/mm							
		0 min	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	1 440 min
水曲柳	28.7	182.0	182.4	182.6	182.7	182.9	183.4	183.6	184.5
	17.0	180.9	181.2	181.5	181.7	181.9	182.0	182.3	182.7
	9.6	179.5	179.6	179.8	180.0	180.0	180.2	180.3	180.5
枫木	17.9	184.3	185.6	186.9	186.9	187.8	189.3	190.5	191.5
	12.6	180.7	180.8	181.0	181.2	180.8	181.4	181.0	181.9
	7.1	180.0	180.0	180.2	180.2	180.2	180.5	180.5	181.0
橡胶木	27.5	180.5	181.1	181.4	181.9	182.3	182.4	182.6	182.9
	17.3	180.1	180.3	180.4	180.5	180.6	180.7	181.2	181.8
	9.8	179.9	180.1	180.1	180.1	179.9	180.0	180.3	180.5

由表 2 能够看出:在 0 时刻,3 种木材的弦长随干燥时间的增加而降低,说明在模具去除后的瞬间,即外力卸载的瞬间,试件的弹性恢复随其终含水率的增加而降低。在整个测量时间内,对于水曲柳,终含水率为 28.7% 的试件弦长变化较其他试件大,弦长增加值为 2.5 mm。其次为终含水率为 17.0% 的试件,弦长增加值为 1.8 mm。最后为含水率为 9.6% 的试件,弦长增加值为 1.0 mm。对于枫木,终含水率为 17.9% 的试件弦长增长显著,弦长增加值为 6.2 mm。终含水率为 12.6% 和 7.1% 的试件弦长变化不大,但终含水率为 12.6% 的试件弦长变化较终含水率为 7.1% 的试件大,弦长增加值分别为 1.2 和 1.0 mm。对于橡胶木,试件弦长变化规

律雷同于水曲柳和枫木试件,终含水率为 27.5%, 17.3% 和 9.8% 的试件弦长变化值分别为 2.4, 1.7 和 0.6 mm。根据试验结果可知,在此软化工艺下,终含水率为 9.6% 的水曲柳试件、7.1% 的枫木试件和 9.8% 的橡胶木试件弦长变化较小,即在同一树种中,终含水率低的试件弦长变化较平缓。

2.2 软化工艺 II

干燥 5, 6.5 和 8 h 后,水曲柳试件终含水率分别为 27.8%, 17.3% 和 10.9%, 枫木试件终含水率分别为 20.8%, 15.3% 和 9.4%, 橡胶木试件终含水率分别为 25.7%, 15.6% 和 8.9%。在 0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 1 440 min 时测量试件弦长,试验结果见表 3。

表 3 软化工艺 II 试件弦长与终含水率的关系

Table 3 The relationship between sample chord and final moisture content in the softening technique II

试件种类	试件含水率 /%	试件弦长/mm							
		0 min	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	1 440 min
水曲柳	27.8	183.5	184.9	185.3	185.5	185.6	187.0	187.6	189.4
	17.3	182.7	182.9	183.5	183.8	184.1	184.6	185.2	186.2
	10.9	178.8	179.0	179.5	179.8	179.8	180.0	180.0	180.3
枫木	20.8	184.1	186.5	186.9	187.1	187.9	188.9	190.0	191.4
	15.3	183.3	184.2	184.5	185.0	185.3	185.5	186.0	187.0
	9.4	180.0	180.2	180.0	180.0	179.9	180.9	180.6	181.4
橡胶木	25.7	180.3	181.0	181.6	182.1	182.6	183.0	183.5	184.2
	15.6	179.1	180.4	180.7	181.1	181.4	181.5	182.1	182.5
	8.9	178.9	178.8	179.0	179.0	179.1	179.3	179.5	179.9

由表 3 能够看出:在软化工艺 II 下,终含水率分别为 27.8%, 17.3% 和 10.9% 的水曲柳试件,0 时刻对应的试件弦长分别为 183.5, 182.7 和 178.8 mm,终含水率分别为 20.8%, 15.3% 和 9.4% 的枫木试件,0 时刻对应的试件弦长分别为 184.1, 183.3 和 180.0 mm,终含水率分别为 25.7%, 15.6% 和 8.9% 的橡胶木试件,0 时刻对应的试件弦长分别为 182.3, 179.1 和 178.9 mm。3 种试件的弹性恢复随其终含水率的增加而增大,变化规律同软化工艺 I。在测量时间内,对于水曲柳,终含水率为 27.8%

的试件弦长变化最显著,其次为终含水率为 17.3% 的试件,最后为含水率为 10.9% 的试件,弦长增加值为 5.9, 3.5 和 1.4 mm。对于枫木,终含水率为 20.8% 的试件弦长增长显著,弦长增加值为 7.4 mm。终含水率为 15.3% 的试件弦长变化较终含水率为 9.4% 的试件大,弦长增加值分别为 4.6 mm 和 1.4 mm。对于橡胶木,试件弦长变化规律雷同于水曲柳和枫木试件,终含水率为 25.7%, 15.6% 和 8.9% 的试件弦长变化值分别为 3.9, 3.4 和 1.0 mm。根据试验结果可知,在此软化工艺下,终含水

率为 10.9% 的水曲柳试件、9.4% 的枫木试件和 8.9% 的橡胶木试件弦长变化较小。

2.3 软化工艺Ⅲ

干燥 5,6.5 和 8 h 后,水曲柳试件终含水率分别为 28.5%,16.9% 和 11.4%,枫木试件终含水率分别为 20.5%,14.9% 和 10.5%,橡胶木试件终含水率分别为 28.4%,15.2% 和 10.8%。在 0,10,20,30,60,120,180,1 440 min 时测量试件弦长。

从表 4 能够看出:在软化工艺Ⅲ下,0 时刻试件弦长的变化规律同软化工艺Ⅰ和软化工艺Ⅱ,水曲柳试件弦长分别为 178.7,178 和 177.5 mm,枫木试件弦长分别为 180.1,179.8 和 178.8 mm,橡胶

木试件弦长分别为 182.0,181.0 和 178.9 mm。在测量时间内,各树种的试件弦长变化值随其终含水率的降低而降低。水曲柳试件的终含水率分别为 28.5%,16.9% 和 11.4%,对应试件弦长变化值为 3.1,1.9 和 1.8 mm。枫木试件的终含水率分别为 20.5%,14.9% 和 10.5%,对应试件弦长变化值为 3.8,3.1 和 2.2 mm。橡胶木试件终含水率分别为 28.4%,15.2% 和 10.8%,对应试件弦长变化值为 2.2,1.3 和 1.0 mm。由此得出,在此软化工艺下,终含水率为 11.4% 的水曲柳试件,10.5% 的枫木试件和 10.8% 的橡胶木试件弦长变化较小。

表 4 软化工艺Ⅲ试件弦长与终含水率的关系

Table 4 The relationship between sample chord and final moisture content in the softening technique Ⅲ

试件种类	试件含水率 /%	试件弦长/mm							
		0 min	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	1 440 min
水曲柳	28.5	178.7	180.0	180.5	180.8	181.3	181.3	181.5	181.8
	16.9	178.0	178.5	178.6	178.9	179.3	179.5	179.8	179.9
	11.4	177.5	178.0	178.3	178.4	178.8	179.0	179.2	179.3
枫木	20.5	180.1	180.7	181.5	181.9	182.4	182.7	183.4	183.9
	14.9	179.8	180.3	180.4	180.5	180.9	181.3	182.1	182.9
	10.5	178.8	178.7	178.7	178.8	178.7	178.9	179.0	180.0
橡胶木	28.4	182.0	182.4	182.5	182.7	183.0	183.5	183.4	184.2
	15.2	181.0	181.1	181.0	181.0	181.1	181.5	182.1	182.3
	10.8	178.9	178.8	179.0	179.1	179.1	179.2	179.5	179.9

3 结果讨论

根据试件弦长变化可知,弯曲木构件的弹性恢复与其终含水率呈正相关关系,即试件终含水率越高,其弹性恢复越大。分析产生上述情况的原因如下:在软化之前,试件在常温下经过浸水处理。水分子的进入使纤维素非结晶区、半纤维素和木素润胀,为分子运动提供自由空间。同时,在水分子作用下,木材成分中的半纤维素和木素玻璃化转变温度降低,而对纤维素玻璃化转变温度影响较小,从而使木材的软化工艺得以实现。木材被软化后,在模具的作用下进行弯曲。在此过程中,模具施加给试件的外力克服了试件因变形而产生的内应力,使得试件中性层以下的纤维素分子链发生皱缩而中性层以上的纤维素分子链发生拉伸,而产生弯曲木构件内部的压缩和拉伸应力。如果此时卸除模具,试件在压缩和拉伸应力的作用下将发生快速回弹。要使其形状稳定就必须增强木材组织的内聚力,使弯曲木构件具有一定的整体刚性。在纤维饱和点以下,木材细胞组织的内聚力随含水率的增大而降低。当弯曲木干燥到很低的含水率时,内聚力增大,整体刚度提高,能抵抗弯曲木构件的内部应力,因而形状保持稳

定。而含水率大于一定程度时,内聚力减小,整体刚性差,不能抵抗弯曲木构件的内部应力,从而出现试件回弹变形^[9]。因此,必须将试件和模具一起进行干燥处理,降低试件的含水率。这个过程是一个应力松弛过程,即试件通过模具作用、经过一段时间,使弯曲时产生的应力得到均衡,形状得以固定。卸除模具后,当试件的终含水率较高时,试件内部纤维素之间存在多层水分子,纤维素分子链之间距离较大,纤维素分子链与水分子以及水分子之间形成氢键。随着试件含水率的降低,水分子被移除,纤维素分子链之间相互靠近,使得纤维素分子链之间形成氢键。鉴于纤维素之间的氢键键能高于水分子以及纤维素分子链和水分子之间氢键键能,故当纤维素分子链之间形成氢键时,其氢键结合力更能抵抗弯曲木构件内部的压缩和拉伸应力,而当纤维素分子链和水分子之间或水分子之间形成氢键,其氢键结合力较难抵抗弯曲木构件内部的压缩和拉伸应力。所以,弯曲木构件的终含水率越高,其弹性恢复越大。对比本试验选择的 3 个软化工艺,当试件终含水率最低时,软化工艺Ⅰ的水曲柳、枫木、橡胶木试件弹性恢复较软化工艺Ⅱ,Ⅲ小。原因可能是当对木材进行加湿加温软化处理时,在玻璃化转变区温

度范围内,高聚物处于高弹态,键段运动被激化,在外力作用下,高聚物呈现出独特的运动形式,即键段沿作用力方向作取向位移运动,形变主要是键段取向运动所引起的大分子构象舒展而做出的贡献。木材被软化后,在弯曲力矩的作用下,作为骨架物质的纤维素分子链产生纵向位移,在顺纹方向上细胞轴向产生褶皱,即受压面褶皱加大,受拉面的褶皱被展平。而此时的半纤维素和木素部分或全部处于高弹态,分子链断裂,在外力的作用下产生塑性流动。由于软化工艺Ⅱ和Ⅲ的软化温度高于软化工艺Ⅰ,木材中半纤维素和木素的分子链断裂程度较大,促进其与纤维素的分离,使得定性后的弯曲木构件弹性恢复较大。

4 结论

(1)弯曲木构件的弹性恢复与其终含水率之间呈正相关关系,即试件终含水率越低,弯曲木构件的弹性恢复越小。

(2)软化工艺Ⅰ下,水曲柳试件终含水率为9.6%、枫木试件终含水率为7.1%和橡胶木试件终含水率为9.8%时,试件弦长变化较小,变化值分别为1.0、1.0和0.6 mm。

(3)软化工艺Ⅱ下,水曲柳试件终含水率为10.9%、枫木试件终含水率为9.4%和橡胶木试件终含水率为8.9%时,试件弦长变化较小,变化值分别为1.4、1.4和1.0 mm。

(4)软化工艺Ⅲ下,水曲柳试件终含水率为11.4%、枫木试件终含水率为10.5%和橡胶木试件终含水率为10.8%时,试件弦长变化较小,变化值分别为1.8、2.2和1.0 mm。

(5)对比本试验所选择的3个树种,当试件终含

水率最低时,软化工艺Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的橡胶木试件弹性恢复较水曲柳、枫木试件小。

(6)对比本试验选择的3个软化工艺,当试件终含水率最低时,软化工艺Ⅰ的水曲柳、枫木、橡胶木试件弹性恢复较软化工艺Ⅱ、Ⅲ小。

致谢:本论文在撰写过程中得到中国林业科学研究院傅峰研究员的悉心指导和帮助,在此特表衷心感谢!

参考文献:

- [1] 李大纲,李坚,刘一星. 热处理对消除水曲柳木材弯曲变形的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2004, 28(3): 24-28.
- [2] 杨创创,史小娟,韩维生,肖建平. 弯曲木构件的形变及其控制措施[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2): 76-78.
- [3] Chika Takahashi, Noriko Nakazawa. Influence of variation in modulus of elasticity on creep of wood during hanging process of moisture[J]. *Holzforschung*, 2006, 60: 445-449.
- [4] Chika Takahashi, Yutaka Ishimaru, Ikuho Iida, Yuzo Furuta. The creep of wood destabilized by change in moisture content. Part 3: The influence of changing moisture history on creep behavior[J]. *Holzforschung*, 2006, 60: 299-303.
- [5] Dwianto W, Morooka T, Norimoto M. Compressive creep of wood under high temperature steam[J]. *Holzforschung*, 2000, 54: 104-108.
- [6] Navi P, Pittet V, Plummer C J G. Transient moisture effects on wood creep[J]. *Wood Science and Technology*, 2002, 36: 447-462.
- [7] Nakano T. Viscosity and entropy change in creep during water desorption for wood[J]. *Wood Science and Technology*, 1996, 30: 117-125.
- [8] Mohager S, Stockholm, Sweden, et al. Long term bending creep of wood in cyclic relative humidity[J]. *Wood Science and Technology*, 1993, 27: 49-59.